



João Miguel Bonifácio Pires

Licenciado em Ciências de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Projeto do Acionamento Eletrónico de um Veículo Unipessoal de Mobilidade Urbana

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. Doutor João Francisco Alves Martins, FCT/UNL

Co-orientador: Doutor Luís Miguel Pereira Pina

Júri :

Presidente:	Prof. Doutor Pedro Miguel Ribeiro Pereira
Arguente:	Prof. Doutor Luís Filipe Figueira de Brito Palma
Vogal:	Prof. Doutor João Francisco Alves Martins



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2014

Copyright

Projeto do Acionamento Eletrónico de um Veículo Unipessoal de Mobilidade Urbana

COPYRIGHT 2014 João Miguel Bonifácio Pires

COPYRIGHT 2014 Faculdade de Ciências e Tecnologias

COPYRIGHT 2014 Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero expressar a minha gratidão aos meus orientadores, Professor João Martins e Professor Luís Pina por me terem proporcionado a oportunidade de trabalhar neste tema desafiante, e pela disponibilidade que sempre manifestaram para discutir novas ideias, acompanhadas de úteis observações e conselhos, que muito ajudaram na elaboração do presente trabalho.

Agradeço aos meus colegas e amigos da FCT, por toda a camaradagem, e ajuda prestada ao longo do curso, em especial, ao Mauro Ramires, João Guerreiro, Carlos Raposo, António Eleutério, Pedro Arsénio, Luís Neto, Tiago Silva, Fábio Querido, João Cruz, entre outros. Tornaram estes anos universitários bem mais divertidos e enriquecedores.

Agradeço também aos meus amigos Almadenses de longa data, Sérgio, Miguel, Diogo, Bispo, Nuno, Caetano, Fonseca, Stoi, Inês, Pacheco, Gonçalo, Teixeira, Mário, Daniel entre outros.. pelos momentos de lazer, mas também de incitamento, acompanhando-me quando estava preocupado, tornando assim mais leve o trabalho de desenvolvimento.

À Empresa Portugal Telecom a minha gratidão por ter confiado em mim nesta etapa final do meu percurso académico. Agradeço ainda aos meus colegas Trainees por todo o apoio e palavras de incentivo.

Por último, queria dedicar uma palavra especial de agradecimento à minha família por tudo o que tem feito por mim, motivando-me constantemente no sentido de ultrapassar todas as dificuldades, que foram muitas. Estou eternamente grato por todo o bem que me fizeram e o vosso amor incondicional.

Resumo

O acionamento eletrónico de motores desempenha um papel cada vez mais importante nos transportes e mobilidade, devido às inúmeras aplicações, entre as quais o controlo de velocidade e direção dos motores das cadeiras de rodas elétricas. No entanto, as soluções disponíveis no mercado apresentam um custo elevado, e consequentemente são inacessíveis para muitas pessoas.

O objetivo desta dissertação é projetar o sistema de acionamento eletrónico para um veículo unipessoal de mobilidade urbana, de acordo com os requisitos estabelecidos, e realizar um protótipo funcional com o mínimo custo possível. O sistema estará subdividido em quatro módulos: interface com o utilizador, controlador central, sistema de potência e atuadores. A sua implementação será feita através da programação num Arduino, o sistema de potência utiliza drivers, e o controlo de velocidade dos motores CC será efetuado por PWM.

O sistema de controlo foi implementado de uma forma modular e parametrizada para que numa próxima fase se possa afinar os parâmetros de controlo do movimento adequando o veículo para diferentes condições de operação.

Numa perspetiva futura, pretende-se que este veículo unipessoal de mobilidade urbana seja comercializado de forma económica e possibilite a mobilidade total em meio urbano a pessoas com limitações de ordem motora.

Palavras-chave: Acionamento eletrónico, Veículo unipessoal de mobilidade urbana, Arduino, Controlo por PWM, Motores CC.

Abstract

The electronic motor drive has an increasingly important role in transport and mobility, due to its the several applications, among which the speed and direction control of the electric wheelchair motors. However, the solutions available on the market have a high cost and, therefore, are unavailable for many people.

The main goal of this dissertation is to design the electronic drive system for a one-person vehicle for urban mobility in accordance with the established requirements, and build a functional prototype with the lowest possible cost. The system is subdivided into four modules: a user interface, a central controller, a power system and actuators. Its implementation will be performed by programming an Arduino, the power system uses drivers, and the speed control of the motor will be conceived through PWM.

The control system was implemented in a modular and parameterized way, so that on a next phase one could tune the control parameters of the vehicle movement, adjusting it to different operating conditions.

In a future perspective, it is intended to commercialize this one-person vehicle in a more economical form, and to enable the possibility for total mobility in an urban environment for people with reduced mobility capabilities.

Keywords: Electronic Drive, One-person Vehicle for urban mobility, Arduino, PWM control, DC motors.

Índice de matérias

Capítulo 1. Introdução	1
1.1 Contexto e Motivação	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Contribuições.....	3
1.4 Estrutura do documento.....	4
Capítulo 2. Revisão Bibliográfica.....	5
2.1 Tecnologias utilizadas em tração elétrica.....	5
2.2 Visão geral da aplicabilidade dos motores CC	6
2.2.1 Motores de magnetos permanentes com escovas.....	7
2.3 Controlo de Direção do motor CC de magnetos permanentes com escovas..	9
2.4 Método de controlo de velocidade por PWM (Pulse Width Modulation)	10
2.4.1 Ponte – H	12
2.5 Sistemas de direção	13
2.5.1 Descrição dos diferentes tipos de direção	14
Capítulo 3. Apresentação do protótipo do sistema e tecnologias utilizadas .	21
3.1 Características Físicas e Dinâmicas do VUMU	22
3.2 Simulação da direção de skid steering.....	23
3.2.1 Princípios do skid steering.....	23
3.2.2 Simulação das equações de cinemática (sem joystick)	24
3.3 Cálculo para determinar as características do motor	29
3.4 Componentes utilizados.....	33
3.4.1 Interface	33
3.4.2 Módulo de Controlo	36
3.4.3 Módulo de potência	43
3.4.4 Módulo Atuadores	44
3.4.5 Alimentação do Sistema de Acionamento Eletrónico.....	47
Capítulo 4. Implementação do sistema	49
4.1 Protótipo do sistema	50
4.2 Testes ao conjunto interface e módulo de controlo	51
4.3 Relés, Transístor, Díodo e módulo de potência	57
4.4 Algoritmo de Controlo dos motores.....	58
4.5 Modelo da trajetória para sistemas que usam skid steering	62
4.5.1 Ensaio com joystick e com variação brusca de velocidade (2º)	62

4.6 Ensaaios experimentais	65
4.6.1 Descrição dos Testes	65
4.6.2 Raio Infinito	67
4.6.3 Raios de 4m, 6m	68
Capítulo 5- Conclusões e Trabalhos Futuros	71
Bibliografia.....	73

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Distribuição do número de beneficiários [4].	2
Figura 1.2 – Núm. de edifícios clássicos segundo a acessibilidade por tipo de edifício [6].	2
Figura 2.1 – Ilustração em corte de um motor CC com escovas [9].	7
Figura 2.2 – Escovas, Magnetos permanentes e estator [10].	8
Figura 2.3 – Motor CC de magnetos permanentes com escovas.	9
Figura 2.4 – Gráfico sinal PWM.	11
Figura 2.5 – Funcionamento do circuito chopper Ponte-H.	12
Figura 2.6 – Comparação dos diferentes sistemas de direção [14].	13
Figura 2.7 – Relações cinemáticas e dinâmicas do skid steering [16].	16
Figura 2.8 – Rodas a diferentes velocidades [17].	18
Figura 3.1 – Diagrama de blocos do SAE.	21
Figura 3.2 - Chassis da cadeira de rodas.	22
Figura 3.3 – Modelo do veículo elétrico de skid steering.	24
Figura 3.4 – Representação do sistema de equações.	25
Figura 3.5 – Representação de todo o sistema.	25
Figura 3.6 – Curva acentuada de 90°.	26
Figura 3.7 – Valores das variáveis da tabela 3.2.	27
Figura 3.8 – Curva acentuada de 45°.	27
Figura 3.9 – Valores das variáveis da tabela 3.3.	28
Figura 3.10 – Roda utilizada no VUMU.	29
Figura 3.11 – Curva velocidade/binário do motor CC (Fonte: adaptado de (17)).	30
Figura 3.12 – Potência máxima do motor CC.	31
Figura 3.13 – Figura representativa das quatro posições do joystick de velocidade.	33
Figura 3.14 – Figura representativa das oito posições do joystick de direção.	34
Figura 3.15 – Joysticks.	35
Figura 3.16 – Arduino UNO [19].	36
Figura 3.17 – Filtro LP + divisor tensão.	38
Figura 3.18 – IC e adaptador.	39
Figura 3.19 – IC Voltage-Controlled PWM.	40
Figura 3.20 – Relé.	42
Figura 3.21 – Driver.	43

Figura 3.22 – Motor CC de magnetos permanentes com escovas.	44
Figura 3.23 – Correntes.	45
Figura 3.24 – Roda.	46
Figura 3.25 – Bateria de Ácido-chumbo.	47
Figura 3.26 – Conversor DC/DC.	48
Figura 4.1 – Protótipo do SAE.	49
Figura 4.2 – Esquema geral de ligações dos componentes do SAE.	50
Figura 4.3 – Joystick de velocidade.	51
Figura 4.4 – Componentes do módulo de controlo.	52
Figura 4.5 - Sinal PWM do Arduino com duty cycle = 20% e 70%.	52
Figura 4.6 – Sinal de saída do filtro com duty cycle = 20% e 70%.	53
Figura 4.7 – Sinal de saída do divisor de tensão com duty cycle = 70% e 91%.	54
Figura 4.8 – Sinal PWM de frequência de 18 KHz com duty cycle de 20% e 70%.	55
Figura 4.9 – Esquema de ligações entre o comando e o módulo de potência.	57
Figura 4.10 – Joystick de direção.	58
Figura 4.11 – Fluxograma do algoritmo de controlo.	61
Figura 4.12 – Trajetória linear.	62
Figura 4.13 – Trajetória frente direita.	63
Figura 4.14 – Trajetória direita.	64
Figura 4.15 – Protótipo da cadeira de rodas.	65
Figura 4.16 – Perspetiva frontal.	66
Figura 4.17 – Perspetiva traseira.	66
Figura 4.18 – Trajetória linear simulada vs Trajetória linear real.	67
Figura 4.19 – Cenário experimental com a representação da trajetoria.	68
Figura 4.20 – Trajetória de R=4m.	69
Figura 4.21 – Trajetória R=6m.	70

Índice de tabelas

Tabela 2.1 – Motores ponderados.	6
Tabela 2.2 – Funcionamento da Ponte H.....	12
Tabela 2.3 – Diferentes técnicas de direção.	14
Tabela 3.1 – Características físicas e dinâmicas da cadeira.	22
Tabela 3.2 – Valores de velocidade teóricos 1º ensaio do skid steering.	26
Tabela 3.3 – Valores de velocidade teóricos 1º ensaio do skid steering.	28
Tabela 3.4 – Mudanças do joystick de velocidade (single axis).	34
Tabela 3.5 – Joystick de direção com 8 posições.	35
Tabela 3.6 – Quatro versões de duty cycle mínimo e máximo.	41
Tabela 3.7 – Principais características da driver.	43
Tabela 4.1 – Valores de saída do conjunto interface e Arduino.	53
Tabela 4.2 – Valores de saída do conjunto Interface, Arduino e filtro.....	54
Tabela 4.3 – Valores de saída do conjunto Interface, Arduino, filtro e divisor de tensão.	55
Tabela 4.4 – Valores de saída do IC.....	56
Tabela 4.5 – Funcionamento do esquema de ligações entre o comando e o módulo de potência.....	57
Tabela 4.6 – Sentido das rodas, de acordo com as diferentes direções.....	59
Tabela 4.7 – Valores das variáveis da Combinação 1.....	63
Tabela 4.8 – Valores das variáveis da Combinação 2.....	63
Tabela 4.9 – Valor das variáveis da combinação 3.	64
Tabela 4.10 – Valores medidos para a trajetória de raio infinito.....	67
Tabela 4.11 – Valores medidos na trajetória de raio igual a 4 metros.	69
Tabela 4.12 – Valores medidos na trajetória de raio igual a 4 metros.	70

Lista de Acrónimos e Abreviatura

SAE	Sistema de Acionamento Eletrónico
VUMU	Veículo Unitário de Mobilidade Urbana
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
BL	Brushless (Sem escovas)
LP	Passa-baixo (Low-Pass)
GND	Massa (Ground)
PWM	Pulse Width Modulation
CW	Sentido Horário (Clockwise)
CCW	Sentido Anti-Horário (Counterclockwise)
RPM	Rotações por minuto
IC	Circuito Integrado (Integrated Circuit)
DAC	Digital Analog Converter (Conversor Digital-Analógico)
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor
PC	Computador (Personal Computer)
USB	Universal Serial Bus

Capítulo 1. Introdução

Neste capítulo, tem-se em primeiro lugar a intenção de explicar o contexto e motivação do trabalho a desenvolver. Em seguida, serão enumerados os objetivos necessários ao projeto e implementação do sistema de acionamento eletrónico (SAE), a integrar na cadeira de rodas elétrica, e os principais resultados obtidos. Por último, será apresentado o subcapítulo referente à estrutura do documento.

1.1 Contexto e Motivação

Um dos principais aspetos respeitantes ao crescimento qualitativo da sociedade tem sido o facto de esta se mostrar, cada vez mais, receptiva à diversidade, nomeadamente quanto aos esforços desenvolvidos no sentido de incluir socialmente pessoas incapacitadas ou com deficiências. Tendo em conta que a evolução do Homem ao longo da sua história tem estado relacionada com o desenvolvimento da ciência, é plausível afirmar que a tecnologia tem proporcionado às pessoas com limitações uma maior independência, qualidade de vida e integração social [1].

Atualmente, existe em Portugal um Instituto Público, o Instituto Nacional para a Reabilitação (INR), responsável por planear, executar e coordenar as políticas nacionais destinadas a promover os direitos das pessoas com deficiências [2]. Em colaboração com o Ministério da Solidariedade e da Segurança Social, o Diário da República publicou um despacho, que define as ajudas técnicas como qualquer produto destinado a prevenir, compensar, monitorizar ou neutralizar algum impedimento/limitação de atividade das pessoas com deficiências ou incapacidades. De acordo com [3], o financiamento dos produtos de apoio (ajudas técnicas), são hierarquizados por níveis de prescrição, de forma a se conhecer o montante de que cada cidadão beneficiará dependendo desse montante da sua situação. Contudo, devido à conjuntura económica em que o País se encontra, além do valor desses financiamentos ser cada vez mais baixo, também o número de beneficiários tem vindo a diminuir, como se pode visualizar na Figura 1.1 [4].



Figura 1.1 – Distribuição do número de beneficiários [4].

A acrescentar a este problema de fundos, segundo o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 60% dos edifícios em Portugal não são acessíveis a cadeiras de rodas, embora na sua maioria, sejam edifícios baixos e de apenas um alojamento. Seguidamente, são apresentadas na Figura 1.2 de um relatório do LNEC, as condições de acessibilidade dos edifícios em Portugal [5].

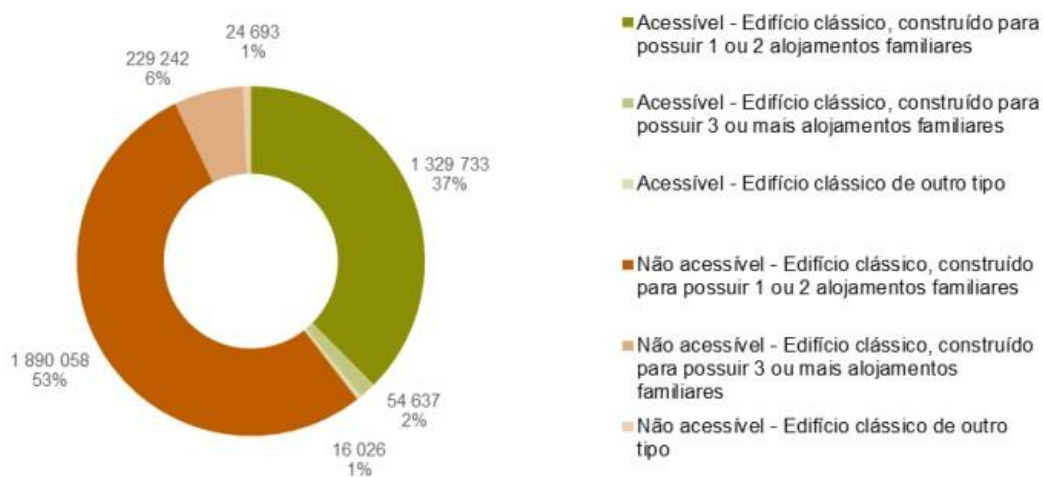


Figura 1.2 – Núm. de edifícios clássicos segundo a acessibilidade, por tipo de edifício [6].

De notar também, que num estudo realizado por [6], o exercício das projeções demográficas indica que a população com mais de 65 anos deverá aumentar de 19% em 2011 para 32% em 2050.

Sendo assim, conseguir desenvolver um protótipo funcional composto por um acionamento eletrónico que seja capaz de superar estas barreiras financeiras, arquitetónicas, e de envelhecimento demográfico da população portuguesa constitui uma solução que poderá ajudar milhares de pessoas que dispõem de poucos recursos financeiros, ou alojadas em edifícios não adaptados às suas limitações.

1.2 Objetivos

O intuito deste trabalho experimental assenta fundamentalmente em elaborar uma solução que corresponda às necessidades do mercado, isto é, que seja mais económica e simples de produzir em massa. Neste contexto, o principal objetivo visa projetar o protótipo de um sistema de acionamento elétrico de um veículo unipessoal de mobilidade urbana, que permita ao seu utilizador deslocar-se num ambiente urbano composto por rampas, escadas, passeios, entre outras barreiras arquitetónicas.

O trabalho desenrola-se nos seguintes pontos:

- Definição dos requisitos de controlo do veículo.
- Planeamento do projeto e identificação das fases críticas.
- Simulações da direção e velocidade do veículo.
- Escolha dos componentes e respetivos testes.
- Integração dos componentes num protótipo funcional.
- Realização de ensaios no protótipo, com o propósito de comparar os resultados experimentais com as simulações.

1.3 Contribuições

Nesta dissertação concebeu-se o protótipo de um sistema de acionamento eletrónico (SAE) de um veículo unipessoal de mobilidade urbana (VUMU), no qual foram efetuados ensaios de percursos previamente simulados em computador. Deste modo, o trabalho desenvolvido fornece contribuições com testes experimentais, tendo em conta o algoritmo de controlo de velocidade e direção dos motores, assim como os dimensionamentos e cálculos necessários na elaboração da placa eletrónica de controlo.

1.4 Estrutura do documento

A dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos.

Primeiramente, é apresentado neste capítulo introdutório o contexto, motivação, objetivos propostos, contribuições do trabalho e organização do documento. Os seguintes capítulos apresentam o trabalho desenvolvido.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica: pretende-se revelar determinados conceitos teóricos relacionados com a direção dos veículos terrestres e o controlo de velocidade dos motores CC por PWM, antes de se proceder ao projeto, de forma a ser feito um enquadramento prévio das temáticas abordadas. Ou seja, apresentam-se os conceitos teóricos necessários que serviram de base ao desenvolvimento dos trabalhos.

Capítulo 3 – Apresentação do Protótipo do Sistema: neste terceiro capítulo são apresentados os requisitos do veículo (cadeira-de-rodas), que ditarão o dimensionamento dos componentes selecionados. Além de serem apresentadas detalhadamente as justificações da sua escolha, também são efetuadas simulações genéricas, de modo a ser evidenciada a cinemática de um veículo com as características físicas do VUMU.

Capítulo 4 – Implementação do Sistema: é demonstrado o funcionamento e características de cada componente, desde a interface com o utilizador até aos atuadores. Posteriormente é abordado o raciocínio e implementação do código efetuado com base nas características do chassis do veículo, assim como os componentes da placa de controlo de velocidade dos motores. Por último, é apresentado o estudo comparativo para vários percursos, entre os dados recolhidos nos ensaios, com as simulações, de maneira a que o desempenho do SAE seja avaliado com o máximo de precisão possível.

Capítulo 5 – Conclusões e Trabalhos Futuros: este último capítulo visa explicar as principais conclusões do trabalho desenvolvido. Adicionalmente, serão mencionadas observações relativamente a eventuais futuras otimizações do sistema.

Capítulo 2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo pretende-se esclarecer a teoria essencial para um desenvolvimento coerente do trabalho. Em primeiro lugar é efetuado um estudo acerca dos motores que se consideraram mais apropriados para o protótipo. Uma vez selecionado o motor, é feita uma contextualização do motor de corrente contínua (CC) na atualidade, de seguida serão apresentadas noções fulcrais acerca do motor de corrente contínua de magnetos permanentes, e os métodos de controlo de direção e velocidade destes motores. Posteriormente, no segundo subcapítulo, proceder-se-á à descrição dos diferentes tipos de direção nos veículos terrestres.

2.1 Tecnologias utilizadas em tração elétrica

Neste subcapítulo pretende-se descrever os motores que foram considerados para este trabalho, e justificar os principais motivos que culminaram na escolha do motor CC de magnetos permanentes com escovas (o seu funcionamento está explicado no subcapítulo 2.2.1).

Inicialmente foram ponderados três motores: o motor passo-a-passo, o motor CC sem escovas, e o motor CC com escovas. A escolha foi limitada a estes tipos de motores, uma vez que se sabia previamente que a fonte de alimentação do sistema seriam baterias de 12V. Esse fator levou à exclusão dos motores de corrente alternada, dado que implicaria a aquisição de mais material, nesta situação inversores dc/ac que convertessem as baixas tensões da bateria em tensões de valor elevado.

Posto isto, teve que ser efetuado um balanço entre as vantagens e desvantagens dos diferentes motores, e decidir qual deles seria o mais apropriado para a aplicação em causa. Seguidamente são listadas na Tabela 2.1 as vantagens/desvantagens dos referidos motores:

Tabela 2.1 – Motores ponderados.

	Motor passo-a-passo	Motor CC sem escovas	Motor CC com escovas
Custo	Baixo	Elevado	Baixo
Relação potência-volume	Baixa	Alta	Moderada/Baixa
Controlo	Complexo	Complexo e dispendioso	Simples
Manutenção	Pouca	Pouca	Periódica
Tempo de vida	Extenso	Extenso	Reduzido

Embora o motor CC com escovas possua desvantagens consideráveis, nomeadamente na necessidade de manutenção periódica (escovas), e um tempo de vida reduzido devido ao desgaste mecânico; uma vez que o sistema a implementar trata-se de um protótipo, os fatores com maior preponderância na escolha do motor são: o custo e a complexidade inerente ao seu controlo.

2.2 Visão geral da aplicabilidade dos motores CC

Os motores CC têm sido tradicionalmente usados na indústria desde o final do século XIX, tendo sido um dos primeiros motores a converter energia elétrica em energia mecânica. A principal vantagem de um motor CC relaciona-se com o facto de a velocidade poder ser alterada ao longo de uma ampla gama de métodos de controlo relativamente simples e precisos [7].

Estes motores podem operar diretamente a partir de baterias recarregáveis, constituindo um dos principais motivos para o seu uso nos primeiros veículos elétricos. Atualmente, os motores CC ainda são usados em diversas aplicações, tais como:

- Pequenos brinquedos;
- Unidades de disco de computadores;
- Linhas de montagem;
- Máquinas de papel;
- Máquinas de impressão;
- Elevadores.

Os motores CC modernos são maioritariamente utilizados em conjunto com dispositivos de eletrónica de potência, apresentando um valor elevado de binário de arranque. De salientar também, que devido aos desenvolvimentos alcançados no campo da eletrónica de potência ao longo dos últimos anos, os motores de corrente contínua são os mais apropriados, no que diz respeito a aplicações que necessitem de potências mais baixas [8].

2.2.1 Motores de magnetos permanentes com escovas

Descrevendo o motor CC de um modo sintético, subdivide-se basicamente em duas partes: o estator e o rotor. O estator é a peça imóvel do motor, sendo o rotor (também designado por armadura) o gerador do movimento do motor.

Em termos gerais, nos motores CC o fluxo magnético do estator é gerado no enrolamento de campo pela corrente contínua, embora nos motores compostos por magnetos permanentes as peças dos pólos principais serem constituídas por material com propriedades magnéticas permanentes, em que o estator é mantido num campo magnético constante. No que diz respeito ao rotor, é alimentado por tensão contínua, em que a interação dos campos magnéticos do estator e da respetiva armadura produzem o binário que gera movimento no rotor [7].

Seguidamente são apresentados na Figura 2.1 os principais componentes que constituem um motor CC com escovas (brushed):

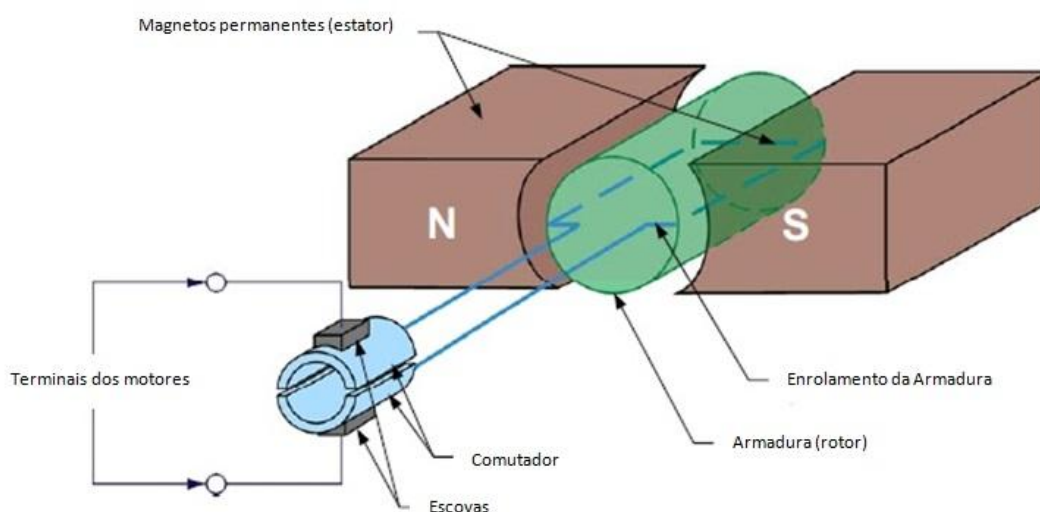


Figura 2.1 – Ilustração em corte de um motor CC com escovas [9].

Através da Figura 2.1 é possível verificar que o estator é formado por uma carcaça de metal envolvida num invólucro de magneto permanente, onde é criado um campo magnético nos enrolamentos. Nas extremidades do estator, encontra-se o rotor, que representa a parte móvel do motor, ligada ao eixo de transmissão de movimento. De notar, que nestes motores a força do campo eletromagnético é dada pela extensão de interação entre o rotor e o estator. As escovas, normalmente constituídas de carvão grafite, são a peça de contacto com o comutador que fornece tensão elétrica ao motor [9]. De acordo com uma outra perspetiva na Figura 2.2 são apresentados o estator de magnetos permanentes, e as escovas do rotor respetivamente.



Figura 2.2 – Escovas, Magnetos permanentes e estator [10].

Assim, nos motores CC de magnetos permanentes com escovas, o enrolamento de campo do estator é substituído por um magneto permanente tornando a sua construção mais simples. Devido aos magnetos permanentes, não é necessária excitação externa, assim como também não é dissipada potência para serem criados campos magnéticos no motor. Outro fator positivo está relacionado com o espaço que ocupam os magnetos que, sendo comparativamente menor ao ocupado pelos enrolamentos, viabiliza motores de menores dimensões.

As desvantagens destes motores estão principalmente associadas ao risco de desmagnetização, devido a correntes elevadas nos enrolamentos do motor, ou ao sobreaquecimento do magneto, bem como ao desgaste a que as escovas vão sendo submetidas, aquando do funcionamento do motor [10].

2.3 Controlo de Direção do motor CC de magnetos permanentes com escovas

Uma das grandes vantagens dos motores CC de magnetos permanentes consiste no facto de ser relativamente simples controlar a sua direção. Todos os motores CC têm dois terminais de saída, ou seja, trocando a alimentação desses terminais a uma bateria (p.e), o motor roda no sentido horário (CW) ou anti-horário (CCW).

O funcionamento do controlo de direção destes motores CC pode ser explicado com base na Figura 2.3. Existem dois campos magnéticos produzidos no motor: um é produzido pelos magnetos permanentes; e o outro, é produzido pela corrente elétrica que atravessa os enrolamentos do motor.

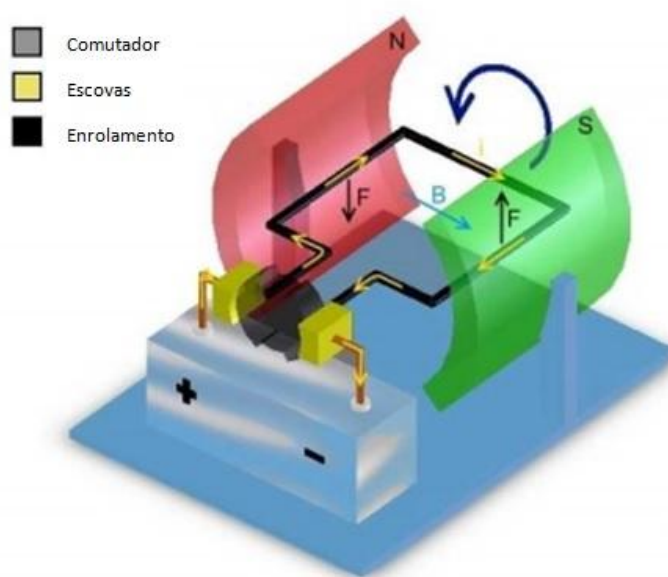


Figura 2.3 – Motor CC de magnetos permanentes com escovas.

Com o auxílio da Figura 2.3, torna-se mais fácil compreender a razão pela qual a corrente que percorre as bobinas do rotor produz o campo magnético necessário, ou por outras palavras, porque é que esse campo magnético circular, produzido pelos enrolamentos da armadura, vai gerar o pólo positivo e negativo em seu redor, que por sua vez será repellido ou atraído pelos magnetos permanentes do estator.

Conforme o rotor vai rodando em CW ou CCW, a corrente nos enrolamentos é comutada de maneira a produzir um binário de saída de valor contínuo. Portanto,

enquanto a armadura gira, a corrente elétrica flui desde os terminais do motor até ao próximo conjunto de enrolamentos da armadura por meio de escovas de carvão localizadas em torno do comutador, produzindo outro campo magnético.

Assim, a velocidade de rotação de um motor de corrente contínua depende da interação entre dois campos magnéticos, um criado pelos magnetos permanentes do estator e outro pela armadura, e é através do controlo desta interação que se conseguirá controlar a velocidade do motor. Uma vez que, o campo magnético produzido pelos magnetos permanentes do estator está fixo, e consequentemente não pode sofrer alterações, então a forma de controlar a velocidade, consiste em manipular a força do campo magnético da armadura, através do controlo da corrente que flui nos enrolamentos.

2.4 Método de controlo de velocidade por PWM (Pulse Width Modulation)

Com o forte desenvolvimento da eletrónica nos anos 50 e 60, a que se juntou o facto de esta tecnologia se ter tornado mais económica nos anos 70 e 80, o controlo por largura de pulso (PWM) tornou-se mais popular [11].

O controlo por PWM é frequentemente aplicado na indústria. Diversos sistemas de controlo de automóveis usam PWM para regular, de forma eficiente, a tensão das baterias aplicada nos atuadores. A simplicidade e baixo custo, quando comparado com as soluções existentes de hardware regulador de tensão, tornam a escolha deste método bastante atrativa para controlar atuadores [12].

Existem inúmeras maneiras de controlar a velocidade dos motores CC, no entanto através de PWM, é possível realizar esse objetivo de forma robusta e acessível. Este método está concebido para controlar a energia (e consequentemente a potência) entregue à carga em máquinas que operam em sistemas de corrente contínua [13]. Seguidamente, são descritas as principais vantagens deste método:

- Sem variações de temperatura, que comprometeriam a linearidade;
- Compatível com os microprocessadores atuais;
- Baixa dissipação de energia.

O PWM recorre a sinais digitais para controlar aplicações de potência, sendo relativamente simples, em termos de eletrónica reconverter o sinal para modo analógico, como por exemplo, através de um filtro passa-baixo de primeira ordem.

Dado que o PWM é uma modulação no tempo, mediante o tempo que o interruptor está ligado, ou desligado, a largura do sinal enviado vai variar. Por outras palavras, quanto maior a duração do tempo em que o interruptor está ligado (tempo em que o PWM permanece a On), maior será o valor de energia entregue à carga. Designando o tempo em que o interruptor está ligado por T_{ON} , e por T_{OFF} o tempo em que o interruptor está desligado, então o período total do sinal PWM é:

$$T = T_{ON} + T_{OFF}. \quad (2.1)$$

$$\text{E o duty cycle do sinal corresponde a } \delta = \frac{T_{on}}{T}. \quad (2.2)$$

Na Figura 2.4 apresenta-se um exemplo de um sinal PWM:

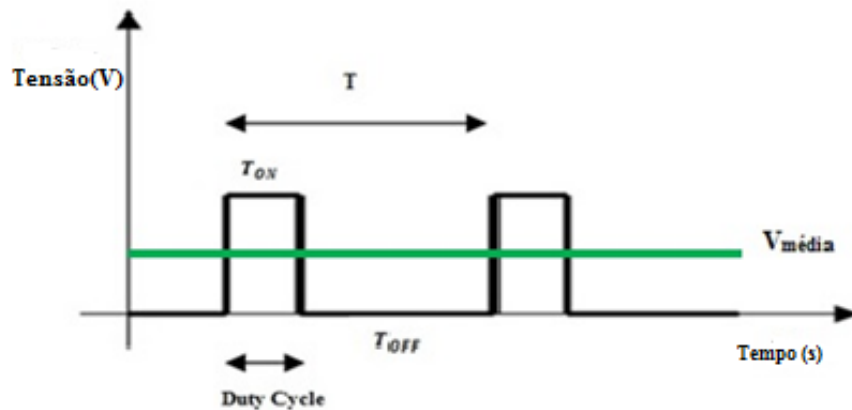


Figura 2.4 – Gráfico sinal PWM.

A tensão média que o motor CC fornece é dada por,

$$V_{média} = \frac{T_{on}}{T} \times V_{entrada} \quad (2.3)$$

Recorrendo à figura 2.4, torna-se então mais perceptível de entender como as expressões (2.1), (2.2) e (2.3) apresentadas estão relacionadas entre si. E como a simplicidade inerente ao funcionamento deste método de controlo de velocidade o torna tão apelativo e prático.

2.4.1 Ponte – H

Usando um circuito chopper ponte-H de quatro quadrantes, semelhante ao da Figura 2.5, é possível o controle suave por PWM da velocidade de um motor CC. O circuito chopper possui um interruptor (IGBT, MOSFET, ou um transístor bipolar), cuja função é controlar o fluxo de corrente que entra no motor CC. Estes circuitos são frequentemente utilizados na robótica, entre outras aplicações que permitam ao motor CC rodar em CW e CCW.

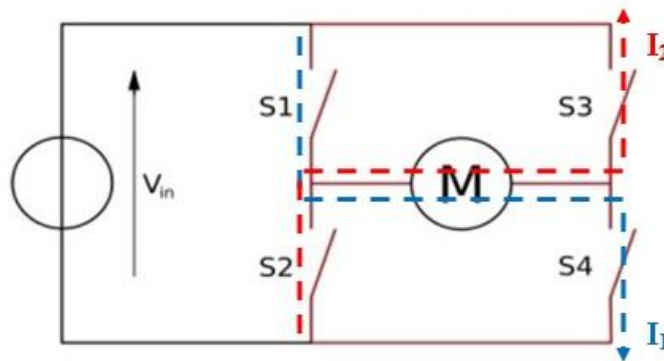


Figura 2.5 – Funcionamento do circuito chopper Ponte-H.

Através da Figura 2.5 verifica-se que a ponte-H é composta por quatro interruptores. Analisando as diferentes situações do circuito, se os interruptores S1 e S4 estiverem fechados e os interruptores S2 e S3 estiverem abertos, o motor rodará no sentido horário. Aplicando o mesmo raciocínio para obter o motor a rodar no sentido anti-horário, os interruptores S2 e S3 têm de estar fechados, e os interruptores S1 e S4 têm de estar abertos. A Tabela 2.2 demonstra todas as situações possíveis:

Tabela 2.2 – Funcionamento da Ponte H.

S4	S3	S2	S1	Descrição
OFF	OFF	OFF	OFF	Sem resultado (free runs)
ON	OFF	OFF	ON	CW
OFF	ON	ON	OFF	CCW
OFF	ON	OFF	ON	Motor desacelera e trava
ON	OFF	ON	OFF	Motor desacelera e trava
ON	ON	OFF	OFF	Shoot-through
OFF	OFF	ON	ON	Shoot-through
ON	ON	ON	ON	Shoot-through

As duas linhas relativas à descrição em que o motor desacelera e trava, representam o estado de curto-circuito do motor, em que o efeito do motor a funcionar como gerador é revertido. Ou seja, o motor em rotação vai gerar uma tensão que tenta forçá-lo a rodar no sentido oposto. Consequentemente, e usando uma ponte H, é desta forma que um motor trava.

Nas últimas três linhas tem-se os interruptores do lado esquerdo, ou do lado direito ligados ao mesmo tempo. Numa situação deste tipo, a corrente que circula no circuito pode atingir valores muito elevados queimando os componentes, e ainda pode danificar a bateria.

2.5 Sistemas de direção

O modelo de direção de um veículo tem um peso importante no método de controlo respeitante às trajetórias que se querem efetuar. Existe um número de métodos possíveis que podem ser aplicados, consoante a direção do veículo [14].

Os sistemas de direção nos veículos de estrada podem ser classificados em três diferentes categorias:

- i. Direção Independente;
- ii. Direção Ackerman;
- iii. Direção Frame Articulated;
- iv. Direção Skid.

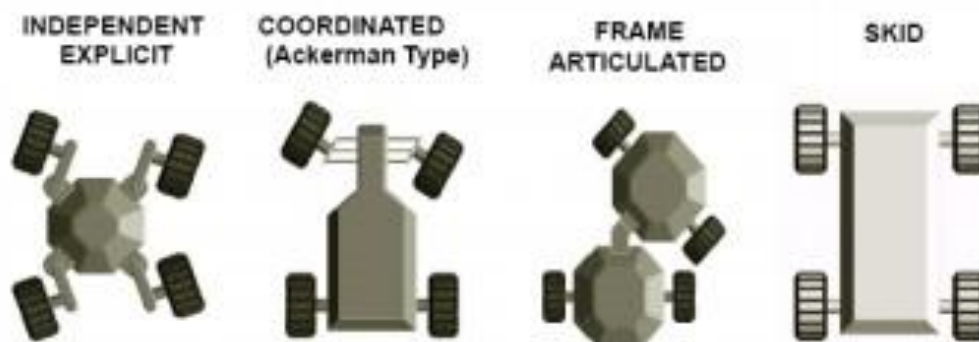


Figura 2.6 – Comparação dos diferentes sistemas de direção [14].

Na Tabela 2.3 pretende-se apresentar as principais diferenças no que diz respeito às características físicas dos diferentes sistemas de direção.

Tabela 2.3 – Diferentes técnicas de direção.

	Independente	Ackerman	Frame	Skid
Manobrabilidade	Alta	Média	Média	Alta
Complexidade mecânica	Alta	Média/alta	Baixa	Baixa
Potência (consumo)	Média	Média/baixa	Média	Alta
Número de juntas na direção	4	1	1	0

2.5.1 Descrição dos diferentes tipos de direção

Seguidamente são descritas de forma mais detalhada as diferentes possibilidades de direção para o VUMU apresentadas na Tabela 2.3. Depois de comparadas e descritas as direções, será justificada de maneira muito sintética a escolha efetuada.

Direção Independente

Nesta abordagem, cada roda é controlada e orientada de forma independente, seguindo cada uma o rumo que for definido. Apesar de possuir um nível de complexidade elevado, devido à precisão de controlo exigido na coordenação das rodas, esta direção proporciona vantagens relativamente à manobrabilidade de robots móveis, principalmente quando são desenvolvidos para operar em terrenos que ainda não foram testados.

A direção independente é a única que torna possível que todas as rodas girem na mesma quantidade, no mesmo sentido. Como tal, o veículo com esta direção pode-se movimentar lateralmente, sendo que a coordenação de condução e direção permite manobras eficientes, dado que o efeito de perdas internas nos atuadores é reduzido por existir menos resistência nas viragens [14].

Direção Ackerman

Nos carros comerciais, está é a direção mais comum, cuja característica principal é poder coordenar mecanicamente o ângulo das duas rodas dianteiras. Sendo o objetivo manter todas as rodas a girar com o mesmo ângulo durante uma curva, as rodas precisam ter raios diferentes provenientes de um centro de massa comum.

As vantagens da direção explícita incluem uma direção mais agressiva com uma melhor navegação (devido ao menor deslizamento das rodas) e menor consumo de energia. A desvantagem consiste em desprezar efeitos dinâmicos importantes, porém o princípio é válido para manobras a baixas velocidades.

Frame steering é predominantemente utilizada em grandes equipamentos de circulação em terrenos que não estão alcatroados. Nos veículos de grande porte, a frame steering tem a vantagem de permitir que o veículo seja significativamente mais manobrável do que um veículo com direção coordenada (Ackerman).

Skid Steering

Outro dos métodos que permite o controle de direção de um veículo terrestre é designado por skid steering. Esta direção tem vindo a ser utilizada em veículos com lagartas, como por exemplo os tanques. Dado que as lagartas não possuem flexibilidade suficiente para que o veículo faça uma curva, o princípio base numa direção skid steering consiste em aumentar a velocidade de um dos lados do veículo, e reduzir a velocidade do outro lado, de forma a ser criado um momento de viragem que se sobreponha à resistência causada pelo deslize das rodas no terreno, e à inércia rotacional do veículo, como mostrado na figura 2.7. [15]

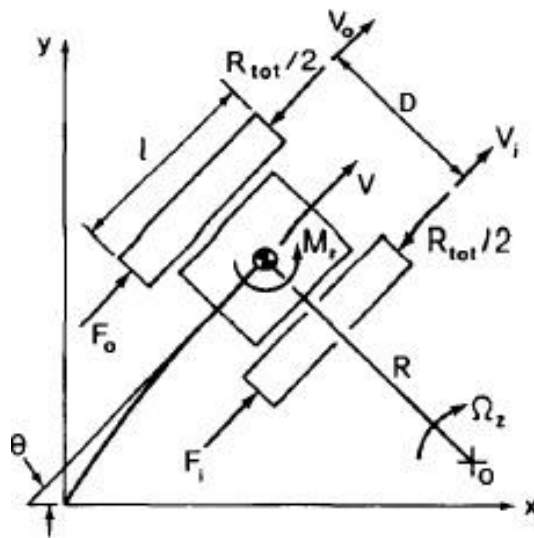


Figura 2.7 – Relações cinemáticas e dinâmicas do skid steering [16].

- V = Velocidade do veículo (m/s)
- V_o = Velocidade das rodas de fora (m/s)
- V_i = Velocidade das rodas de dentro (m/s)
- F_o = força de impulso exterior (N)
- F_i = força de impulso interior (N)
- M = momento de resistência na viragem (Nm)
- D = largura do veículo (m)
- R = Raio da curva do veículo (m)
- θ = ângulo de deslocamento ($^\circ$)

Tendo em conta que o momento de viragem é geralmente considerável, é exigida maior potência numa curva, do que o deslocamento em linha reta. A acrescentar a esse facto, quando é efetuada uma curva, o lado interior do veículo pode ter que travar, e conseqüentemente isto vai resultar numa redução do arranque longitudinal que o veículo é capaz de desenvolver. [16]

Apesar de ser uma solução de controlo eficaz e relativamente simples de conduzir, não é um método tão preciso como os métodos de direção anteriormente descritos, uma vez que está mais sujeito ao deslizamento e fricção devido às características da sua estrutura. O deslizamento tem como principal desvantagem fazer com que haja requisitos de potência imprevisíveis, uma vez que existem irregularidades no terreno e a interação do pneu com o terreno é não-linear.

Devido maioritariamente à baixa complexidade mecânica, alta manobrabilidade e pouco espaço necessária para as rodas, considerou-se a direção skid steering como a mais adequada para o VUMU.

Análise da cinemática do skid-steering

O cálculo da velocidade e do raio do VUMU é efetuado através das equações (2.3) e (2.4). De notar que, os valores calculados não têm em conta o fator de deslizamento (slip) descrito no subcapítulo 2.5.1.3.

$$R_{desired} = \left(\frac{V_0 + V_i}{V_0 - V_i} \right) \times \frac{d}{2} \quad (2.4)$$

$$V_{desired} = \frac{V_0 + V_i}{2} \quad (2.5)$$

Uma vez que se quer determinar o valor da velocidade das rodas do lado esquerdo, e das rodas do lado direito da cadeira-de-rodas, as duas equações têm que ser desenvolvidas em ordem a V_0 e V_i :

$$\begin{cases} V_0 = 2 \times V_{desired} - V_i \\ V_i = V_{desired} - \frac{V_{desired} \times d}{2 \times R_{desired}} \end{cases} \quad (2.6)$$

Explicação física da trajetória x,y do VUMU

Em primeiro lugar, antes de desenvolver o modelo da trajetória há que ter em conta que o raciocínio de como determinar a trajetória do VUMU baseia-se em saber qual a velocidade a que as rodas vão virar. Ou seja, tenta-se prever o comportamento do sistema tendo em conta as suas entradas. [17]

Na Figura 2.8 abaixo está representada a geometria das rodas durante uma curva:

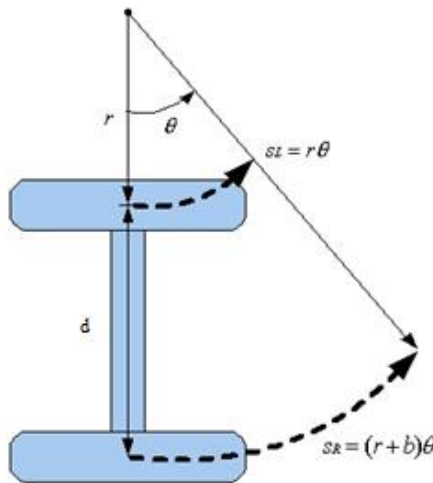


Figura 2.8 – Rodas a diferentes velocidades [17].

Das expressões e variáveis observadas na Figura 2.8, o S_L e S_R representam a distância percorrida das rodas do lado esquerdo e direito respectivamente. O r representa o raio de curvatura, d a distancia entre as rodas de lados opostos, e θ o ângulo de curvatura.

Percebendo esta geometria simples deste tipo de direção, é possível desenvolver algoritmos que descrevam a trajetória do veículo. De notar que é considerada sempre uma velocidade constante, isto é, não são contabilizados os efeitos da aceleração.

Para desenvolver o modelo é necessário entender como os valores das coordenadas x, y variam ao longo do tempo, pois estas vão-se alterar consoante a velocidade das rodas e a orientação escolhida. No subcapítulo 2.5.1.3 viu-se que a velocidade do VUMU é:

$$m(t) = V = \frac{V_0 + V_i}{2} \quad (2.7)$$

E tendo as funções de velocidade e orientação em função do tempo, a solução dada é:

$$\frac{dx}{dt} = m(t) \times \cos(\theta(t)) \quad (2.8)$$

$$\frac{dy}{dt} = m(t) \times \sin(\theta(t)) \quad (2.9)$$

Substituindo (2.7), em (2.8) e (2.9):

$$\frac{dx}{dt} = \left[\frac{V_0+V_i}{2} \right] \times \cos(\theta(t)) \quad (2.10)$$

$$\frac{dy}{dt} = \left[\frac{V_0+V_i}{2} \right] \times \sin(\theta(t)) \quad (2.11)$$

A orientação do veículo é dada por:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{V_0-V_i}{b} \quad (2.12)$$

$$\theta(t) = \left[\frac{V_0-V_i}{b} \right] t \times \theta_0 \quad (2.13)$$

Integrando de forma a obter a trajetória x,y:

$$x(t) = x_0 + \frac{d}{2} \times \frac{V_0+V_i}{V_0-V_i} \left[\sin\left(\frac{V_0-V_i}{d} t\right) - \sin(\theta_0) \right] \quad (2.14)$$

$$y(t) = y_0 + \frac{d}{2} \times \frac{V_0+V_i}{V_0-V_i} \left[\cos\left(\frac{V_0-V_i}{d} t\right) - \cos(\theta_0) \right] \quad (2.15)$$

De salientar que o termo $\frac{d}{2} \times \frac{V_0+V_i}{V_0-V_i}$ representa o raio da curva na trajetória circular efetuada pelo VUMU.

Capítulo 3. Apresentação do protótipo do sistema e tecnologias utilizadas

O sistema deste trabalho centra-se na implementação do acionamento elétrico de um VUMU, concebido de acordo com a descrição das características solicitadas. Neste capítulo pretende-se contextualizar o leitor acerca dos aspetos mais relevantes do protótipo, de forma a tornar possível compreender a razão de todas as decisões tomadas. As tecnologias utilizadas vão ser descritas de forma detalhada, sendo justificada pormenorizadamente a razão de terem sido escolhidas, através do auxílio de simulações genéricas e os cálculos relativos ao seu dimensionamento.

Na Figura 3.1 está representada a arquitetura proposta para o controlo de velocidade e acionamento da cadeira de rodas. Desde logo observa-se que se obtém informação de feedback acerca da velocidade dos motores, ou seja, os motores estão a ser controlados em malha fechada, na qual o utilizador é um controlador humano que fecha o anel de controlo e recebe os sinais (pseudo sensor) atuando conforme o valor destes.

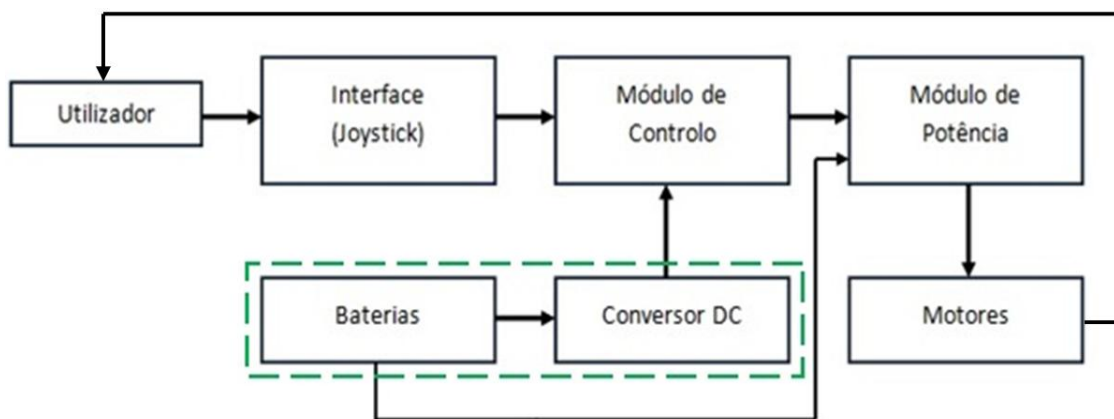


Figura 3.1 – Arquitetura do SAE.

Apresentado de maneira sequencial a arquitetura da Figura 3.1, em primeiro lugar a transmissão das necessidades do Utilizador para o Sistema de acionamento elétrico (SAE), é efetuada através dos Joysticks. Seguidamente, tem-se o módulo de controlo que se subdivide num microcontrolador e um circuito integrado, onde está inserido o algoritmo de controlo de velocidade e direção, e é gerado o sinal PWM. O módulo de potência é composto por drivers ponte-H, cujo valor de corrente que lhes atravessa ascende às unidades de Ampère, possibilitando o funcionamento dos

motores à velocidade e direção desejada, de acordo com o código programado no módulo de controlo. Por último, os blocos no interior do tracejado verde da arquitetura estão associados à alimentação do sistema, em que as baterias estão ligadas diretamente ao módulo de potência, e o conversor DC que fornece a tensão exigida pelo microcontrolador, de forma a não ser necessário estar ligado a um computador.

O terceiro capítulo tem portanto o pressuposto, antes de fundamentar os motivos que levaram à escolha dos diferentes componentes que compõem os blocos da arquitetura da Figura 3.1, indicar os aspetos *a priori* que definiram o género de controlo de direção e velocidade a realizar. Naturalmente que os referidos aspetos condicionaram algumas das decisões tomadas.

3.1 Características Físicas e Dinâmicas do VUMU

Neste subcapítulo são apresentadas as características físicas e dinâmicas da cadeira de rodas, que representam as especificações da dissertação e, consequentemente definiram o desenvolvimento da mesma.

Na Tabela 3.1 estão representadas as características físicas da cadeira de rodas:

Tabela 3.1 – Características físicas e dinâmicas da cadeira.

Características físicas	
Comprimento	1,20 m
Largura	1,00 m
Tara aproximada	75 Kg
Peso Bruto	200 Kg
Características dinâmicas	
Velocidade máxima	10 Km/h
Inclinação máxima de subida	20°




Figura 3.2 - Chassis da cadeira de rodas.

Dos valores demonstrados na tabela, destaca-se o valor solicitado do peso bruto, que engloba o peso da estrutura constituída por alumínio, mais o peso da pessoa sentada na cadeira, e o peso das baterias e motores a selecionar. Estas duas características vão ditar as especificações dos motores a escolher, de forma a ser cumprido o requisito de velocidade.

O chassis da cadeira, também possui um papel determinante, respeitante ao controlo de direção do veículo. Isto porque, como se pode visualizar pela Figura 3.2, a cadeira apresenta uma direção skid steering (ver subcapítulo 2.5.1.3), em que qualquer curva que o utilizador queira efetuar é realizada através da diferença de velocidade entre as rodas do lado direito e esquerdo.

3.2 Simulação da direção de skid steering

Tendo em conta a direção existente, é efetuado previamente um estudo no subcapítulo 2.5.1.3. Na cadeira de rodas em estudo, não existe um mecanismo que permita alterar a direção das rodas, assim, será necessária a implementação de um sistema de direção que permita o utilizador controlar a trajetória através da manipulação de dois joysticks.

O utilizador deve conseguir selecionar várias velocidades e raios de curvatura, de maneira a manobrar a cadeira de rodas pela trajetória desejada.

Dado que as rodas estão fixas à estrutura e não são manobráveis, será necessário a implementação de um sistema de velocidades diferentes, em que as rodas da direita são independentes das rodas da esquerda e vice-versa.

O sistema implementado deve criar um momento de rotação quando as rodas são colocadas a velocidades diferentes.

3.2.1 Princípios do skid steering

Como se pode observar na Figura 3.3, quando se pretende fazer a cadeira curvar através de uma trajetória de raio R a uma velocidade V , as velocidades das rodas têm de ser distintas. Como representado, se a rotação pretendida for no sentido horário, no que concerne a velocidade das rodas da parte exterior, o valor de V_o tem de ser superior à velocidade das rodas interiores V_i .

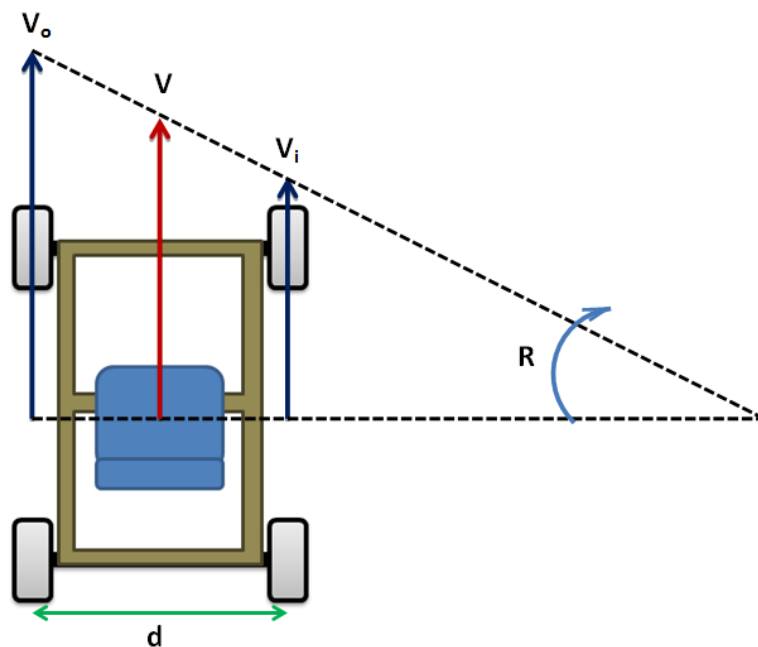


Figura 3.3 – Modelo do veículo elétrico de skid steering.

- V = Velocidade do veículo (m/s)
- V_o = Velocidade das rodas de fora (m/s)
- V_i = Velocidade das rodas de dentro (m/s)
- d = largura do veículo (m)
- R = Raio da curva do veículo (m)

3.2.2 Simulação das equações de cinemática (sem joystick)

Com o intuito de serem analisadas duas situações de velocidade e trajetória, recorrendo às equações (2.4) e (2.5) apresentadas no subcapítulo 2.5.1.3, foi criado o diagrama de blocos da Figura 3.4.

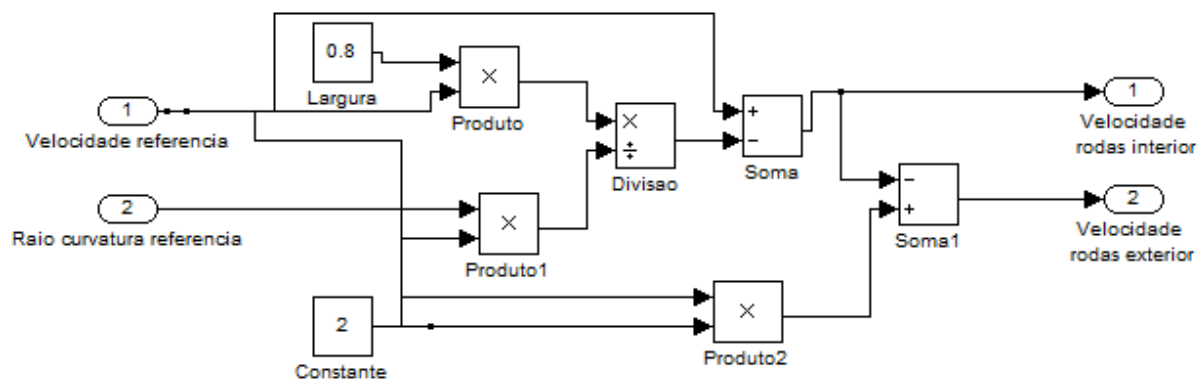


Figura 3.4 – Representação do sistema de equações.

Como se pode constatar pela Figura 3.4, as entradas do sistema são a velocidade e curvatura desejadas pelo utilizador, e as saídas são a velocidade das rodas do lado externo e interno da curvatura.

Na Figura 3.5 está representado o encapsulamento do sistema da figura anterior, com o propósito de se obter os gráficos da sua resposta.

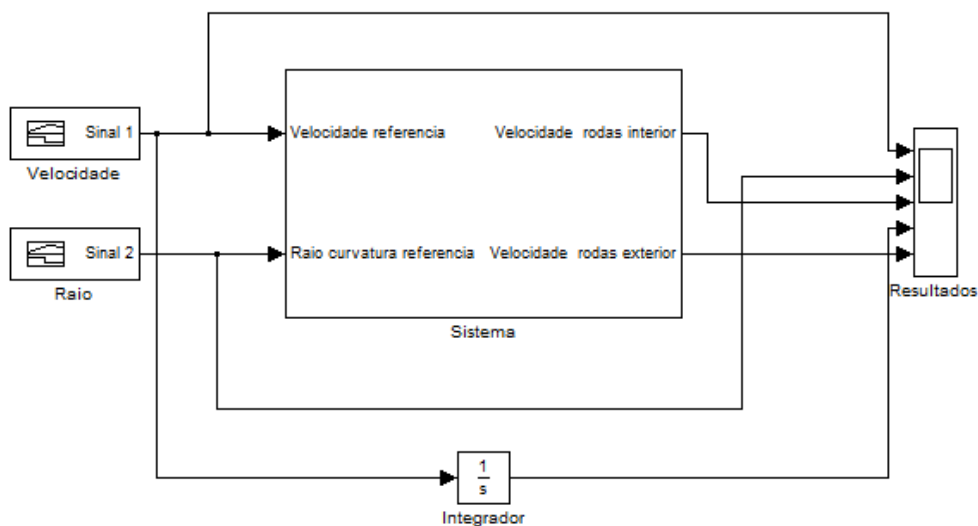


Figura 3.5 – Representação de todo o sistema.

Para caracterizar o sistema, realizaram-se duas simulações com parâmetros de velocidade e raios distintos.

Simulação 1:

Na primeira simulação, pretende-se simular o percurso do utilizador a fazer uma curvatura em que este se encontra num espaço exterior, como por exemplo uma rua de uma cidade.

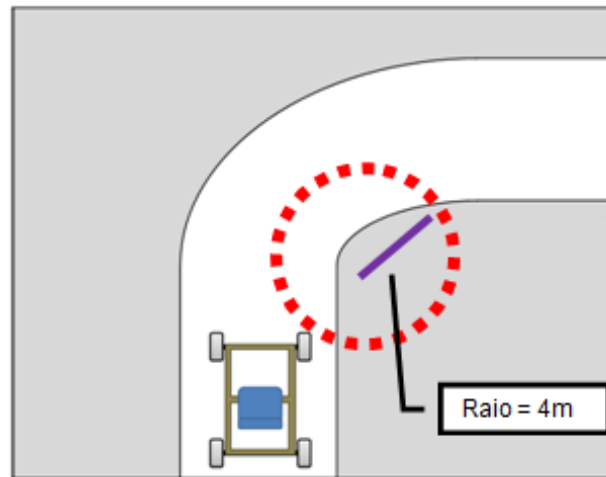


Figura 3.6 – Curva acentuada de 90°.

A velocidade do veículo a ser considerada é de 7,2 km/h antes de entrar na curva, e 5,4 km/h ao longo da curva. O raio é de 4 metros e o ângulo de deslocamento na curva é de $\theta = 90^\circ$, o que se adequa ao trajeto pretendido.

A tabela 3.2 sintetiza os valores das variáveis existentes na Figura 3.7.

Tabela 3.2 – Valores de velocidade teóricos 1º ensaio do skid steering.

Raio desejado (m)	Velocidade de referência (m/s)	V_0 (m/s)	V_i (m/s)	Distância percorrida ao longo da curva (m)	Distância percorrida (m)
4	2 (antes e depois da curva)	1,35	1,65	6	17
	1,5 (na curva)				

De maneira a serem representadas as velocidades das rodas, simula-se o sistema para estes valores como está representado na Figura 3.7.

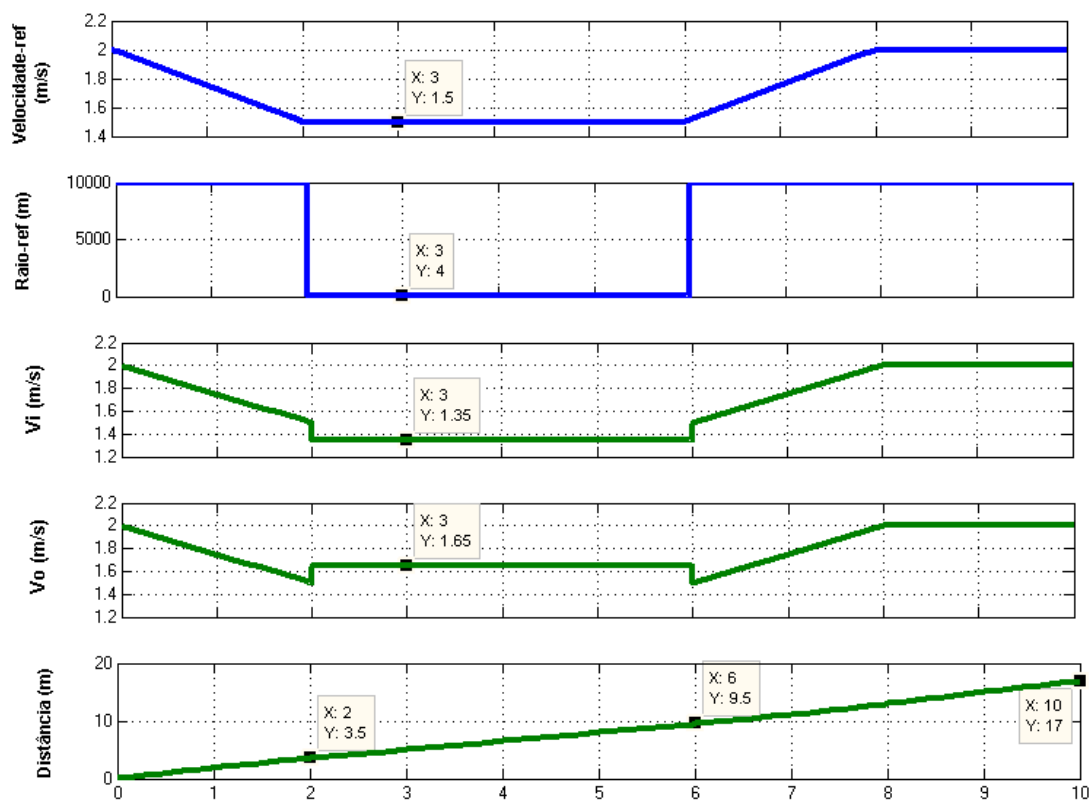


Figura 3.7 – Valores das variáveis da tabela 3.2.

Simulação 2

Na segunda simulação, também se pretende simular o percurso do utilizador a fazer uma curvatura em que este se encontra num espaço exterior, mas nesta situação a curva apresenta um ângulo $\theta = 45^\circ$.

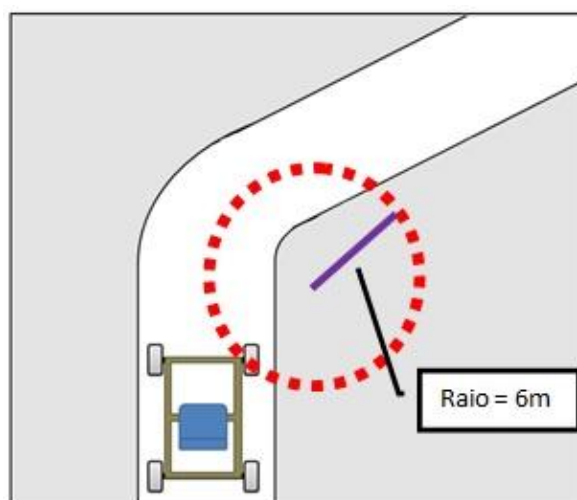


Figura 3.8 – Curva acentuada de 45° .

A velocidade do veículo a ser considerada é de 7,2 km/h antes de entrar na curva, e 6,3 km/h ao longo da curva, relativamente ao raio é igual a 6 metros.

Na Tabela 3.3 estão sintetizados os valores de entrada e saída da simulação 2.

Tabela 3.3 – Valores de velocidade teóricos 1º ensaio do skid steering.

Raio desejado (m)	Velocidade de referência (m/s)	V_0 (m/s)	V_i (m/s)	Distância percorrida ao longo da curva (m)	Distância percorrida (m)
6	2 (antes e depois da curva)	1,867	1,633	10	18
	1,75 (na curva)				

De forma a serem representadas as velocidades das rodas, simula-se o sistema para estes valores como está representado na Figura 3.9.

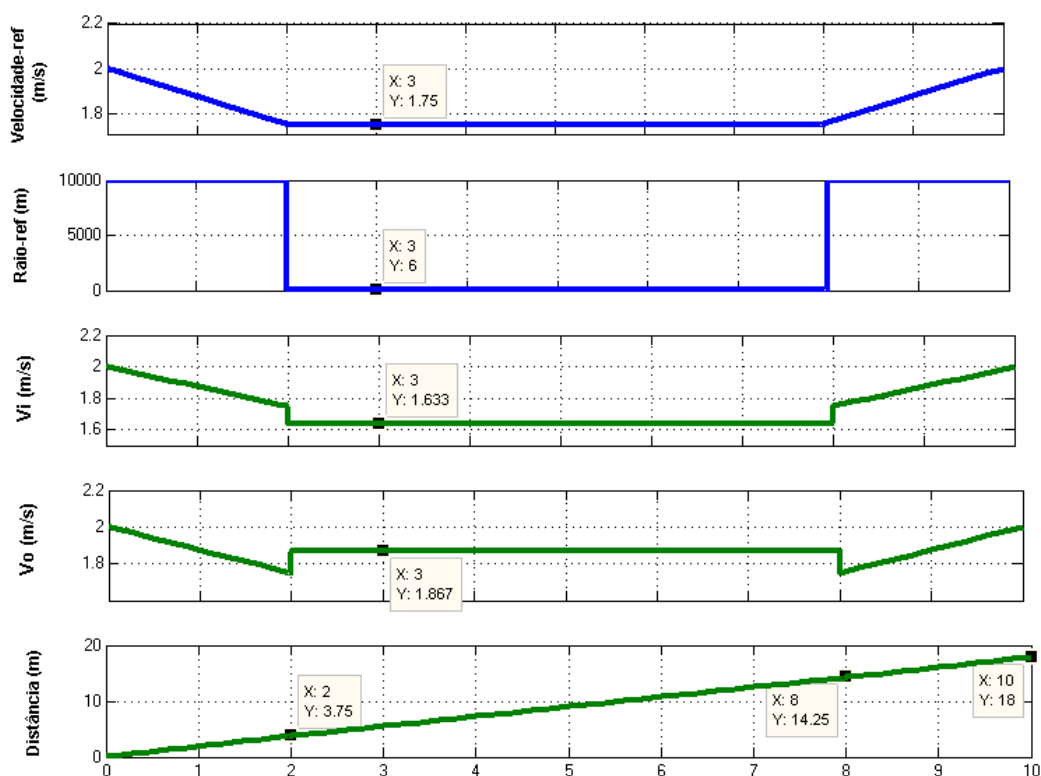


Figura 3.9 – Valores das variáveis da tabela 3.3.

3.3 Cálculo para determinar as características do motor

Na Figura 3.10, é possível visualizar uma das quatro rodas que constituem o VUMU. De referir que a mesma, possui um diâmetro de 250 mm, e o peso bruto (chassis + pessoa + 2 baterias + 4 motores) equivale a 200kg. De seguida, serão apresentados os cálculos que permitem determinar as principais características do motor.

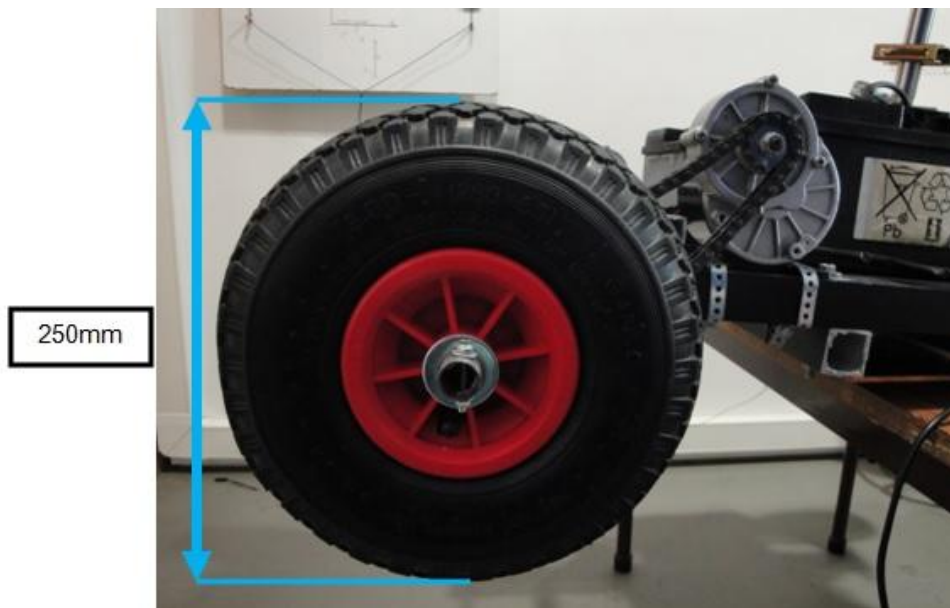


Figura 3.10 – Roda utilizada no VUMU.

Como foi mencionado no Capítulo 1, em futuras versões deste projeto é pretendido que este esteja apto para superar barreiras arquitetónicas que no limite tenham inclinações de 20°. Deste modo, desprezando o atrito, considera-se que para colocar em movimento uma massa de 200Kg numa inclinação limite, a força terá de ser equivalente a um valor mínimo de:

$$F = 200\text{Kg} \times 9,8\text{N.m} \times \sin(20^\circ)$$

De forma a vencer a inércia de uma massa de 200Kg e dado que a força é representada por:

$$F = m \times g \Leftrightarrow F = 200 \times 9,8$$

Então a força vai ser igual a: $F = 1960 \text{Kg} \frac{N}{m}$

Sabendo que a expressão do binário é dada por:

$$\tau = F \times \text{raio} \quad (3.1)$$

E as rodas têm um raio=125mm, o binário necessário será $\tau = 245 \text{N.m}$

No gráfico abaixo está uma curva típica do desempenho do motor CC, de notar que o binário é inversamente proporcional à velocidade de saída do eixo. Como tal, existe um tradeoff entre o valor do binário e o valor de velocidade do motor [18].

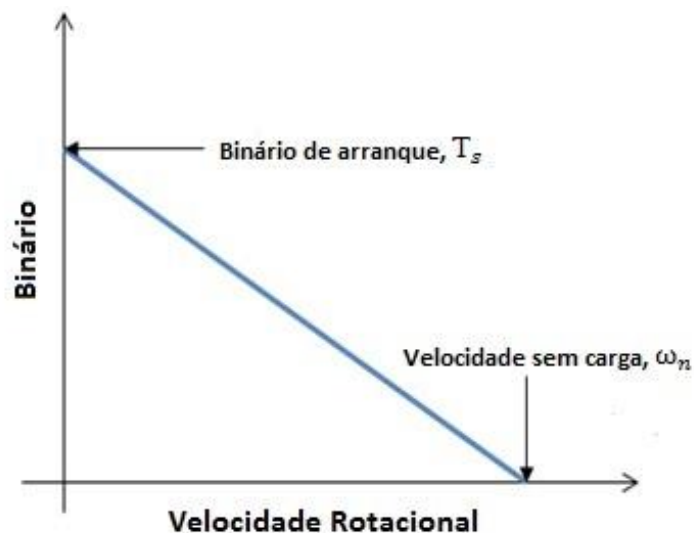


Figura 3.11 – Curva velocidade/binário do motor CC (Fonte: adaptado de (17)).

A curva da Figura 3.11 é definida pelas equações (3.2) e (3.3), em que (3.2) diz respeito ao binário, e (3.3) à velocidade. Sabendo que T_s representa o binário de arranque, e ω_s representa a velocidade do motor em vazio:

$$T_{motor} = T_s - \omega T_s / \omega_n \quad (3.2)$$

$$\omega_{motor} = (T_s - T) \omega_n / T_s \quad (3.3)$$

No que diz respeito à potência exigida para o motor da roda, o cálculo poderá ser efetuado através de: Potência = Binário x velocidade angular. Pode-se visualizar na Figura 3.12, que esse valor vai corresponder à área do retângulo abaixo da reta binário/velocidade. Um dos cantos está situado na origem e o outro na interseção com a reta. Tendo em conta, a relação inversamente proporcional entre o binário e a velocidade a potência máxima ocorre no ponto $\omega = 0.5\omega_n$, e $T = 0.5T_s$.

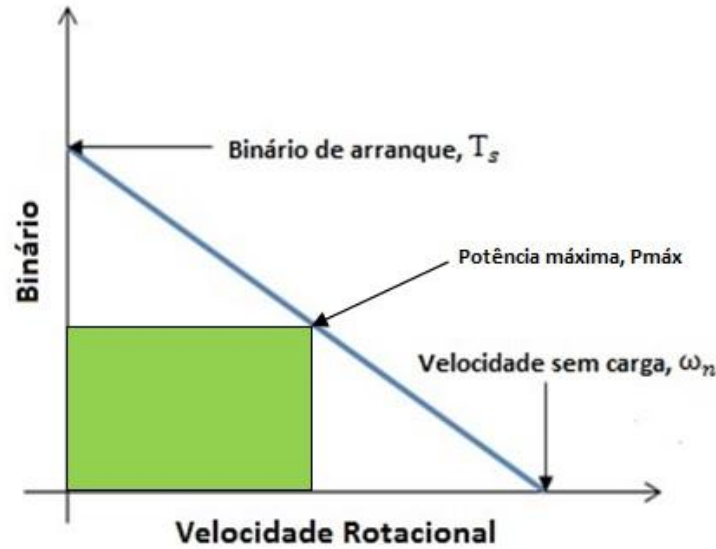


Figura 3.12 – Potência máxima do motor CC.

Substituindo as equações (3.2) e (3.3) na expressão da potência, obtém-se:

$$P_{motor}(\omega) = -\left(\frac{T_s}{\omega_n}\right)\omega^2 + \omega T_s \quad (3.4)$$

$$P_{motor}(T) = -\left(\frac{\omega_n}{T_s}\right)T^2 + \omega_n T \quad (3.5)$$

Conclui-se deste gráfico e das equações apresentadas, que para obter a potência máxima para um motor CC, ter-se-á que efetuar os cálculos usando metade do valor do binário e da velocidade angular (rotações por minuto - RPM).

A velocidade angular é calculada com base na seguinte expressão:

$$1 \frac{rad}{s} = \left(\frac{2\pi}{60}\right) \times RPM \quad (3.6)$$

Logo, tendo em conta que a velocidade máxima especificada é igual a 10km/h, calcular-se-á o valor em RPM com base no diâmetro da roda.

$$\text{Perímetro: } P = 2\pi r \Leftrightarrow P = 0,7854\text{m}$$

$$\text{Convertendo para m/s: } \frac{10 \times 10^3}{3600} = 2,77\text{m/s}$$

$$\text{Seguidamente procede-se à conversão para RPS's: } \frac{2,77\text{m/s}}{0,7854} = 3,54 \text{ RPS}$$

$$\text{Por último, } \text{RPM} = 3,54\text{RPS} \times 60 = 212,2\text{RPM}$$

$$\text{Como tal a velocidade angular} = 2\pi \times 3,54 = 22,2 \text{ rad/s}$$

De forma a ser calculada a potência máxima do motor os valores do binário e da velocidade angular serão reduzidos a metade, como se explicou com recurso ao gráfico. Como tal:

$$\tau = \frac{122,5}{2} = 61,25\text{N.m e velocidade angular} = \frac{22,2}{2} = 11,1 \text{ rad/s}$$

Então a potência para o motor de cada roda é igual a:

$$\text{Potência} = \frac{61,25 \times 11,1}{4} \approx 170 \text{ W}$$

Em suma, cada motor terá que apresentar nas suas especificações um valor mínimo de potência igual a 170W, de maneira a que o VUMU cumpra os requisitos exigidos.

Traduzindo para número de cavalos, sabendo que 1CV = 735,5W, então a cadeira de rodas necessita ter:

$$\frac{680 \text{ W}}{735,5\text{W}} \approx 0,93\text{CV}$$

3.4 Componentes utilizados

Nesta seção procede-se à descrição dos principais componentes utilizados na implementação do SAE, nomeadamente o joystick (módulo – interface), o microcontrolador, o circuito integrado que gera a frequência apropriada para um funcionamento eficiente dos motores (encapsulados no módulo de controlo), as drivers (módulo de potência), os motores e engrenagens (atuadores) que conferem o binário necessário de forma a serem cumpridas as especificações da cadeira e, por último, as baterias que alimentam todo o sistema.

3.4.1 Interface

Os joysticks são utilizados em inúmeras aplicações, desde elevadores, guindastes, jogos, assim como nas cadeiras de rodas por representarem um dos meios mais simples de as controlarem.

Nesta dissertação a transmissão das necessidades do utilizador para o SAE é efetuada através de dois tipos diferentes de joysticks. Um joystick de 2 sentidos na mesma direção, de maneira a ajustar a velocidade do VUMU; e um joystick com 8 sentidos em 4 direções para ajustar a trajetória do VUMU.

Primeiramente são apresentadas as características do joystick de velocidade:

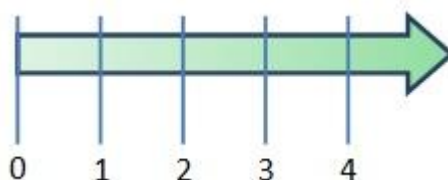


Figura 3.13 – Figura representativa das quatro posições do joystick de velocidade.

Tabela 3.4 – Mudanças do joystick de velocidade (single axis).

Posição	Ação de controlo
4	Velocidade máxima
3	Velocidade moderada
2	Velocidade lenta
1	Velocidade muito lenta
0	Parado

De seguida, são apresentadas as características do joystick de direção:

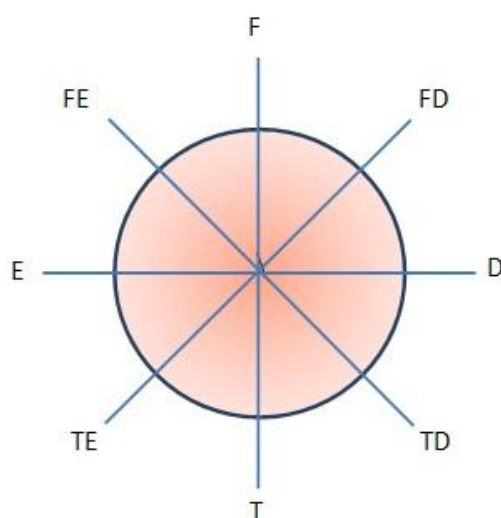


Figura 3.14 – Figura representativa das oito posições do joystick de direção.

Observando a ilustração, e tendo em conta as duas simulações efetuadas no subcapítulo 3.2.2, é possível afirmar que no caso da Simulação 1, em que o utilizador necessita de fazer uma curva de 90° é utilizada a direção direita, e na Simulação 2 (curva de 45°) usar-se-á a direção frente direita.

Na Tabela 3.5 está apresentada a descrição para cada posição:

Tabela 3.5 – Joystick de direção com 8 posições.

Direcção	Movimento
F	Cadeira move-se para a frente
T	Cadeira move-se para trás
D	Direção da Cadeira roda para a direita (90°)
E	Direção da Cadeira roda para a esquerda (90°)
FD	Direção da Cadeira roda para a direita (45°)
FE	Direção da Cadeira roda para a esquerda (45°)

Os joysticks escolhidos encontram-se apresentados na figura abaixo. Em relação ao joystick de velocidades optou-se pelo *APEM - BF240A01BK1200 - JOYSTICK CONTROLLER SINGLE AXIS[®]* em que o seu tipo de sensor é Hall Effect, e no que diz respeito ao joystick de direção foi adquirido o *ETI SYSTEMS - J1-00105[®]* que é um potenciómetro.



Figura 3.15 – Joysticks.

Relativamente às especificações elétricas do *APEM - BF240A01BK1200 - JOYSTICK CONTROLLER SINGLE AXIS[®]* possui uma tensão de saída na posição central equivalente a metade (visualizando a Figura 3.13 corresponde à posição 2) da tensão de alimentação, isto é de 2,5V. No que diz respeito à corrente, é aconselhado que não exceda os 20mA.

3.4.2 Módulo de Controle

Este módulo é composto pelo microcontrolador Arduino Uno e o circuito integrado. Vão ser descritas as suas principais características e, posteriormente, é explicado o dimensionamento do IC, de forma a gerar a frequência de saída desejada.

Arduino UNO

A placa com microcontrolador apresentado na Figura 3.16 é um Arduino Uno, tendo sido o modelo eleito para programar o algoritmo de controle de velocidade e direção do VUMU.

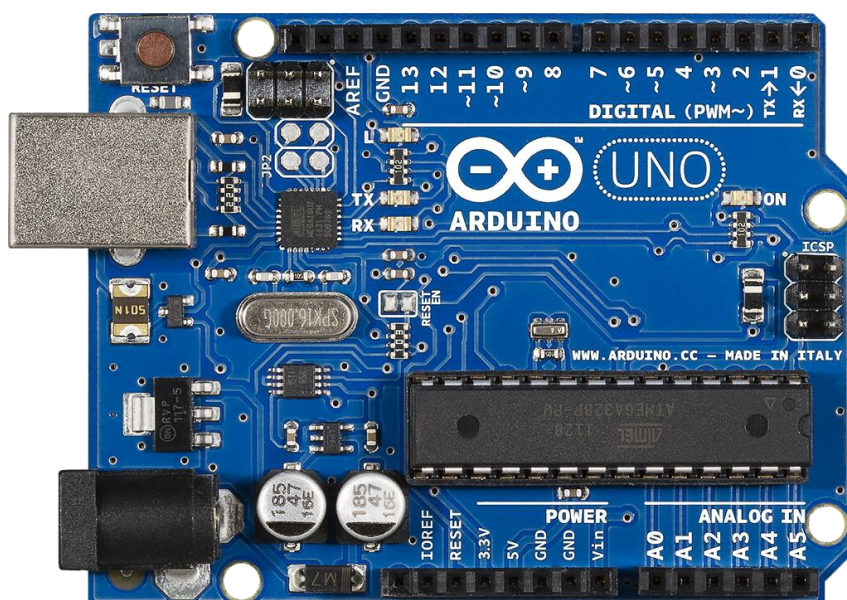


Figura 3.16 – Arduino UNO [19].

O Arduino Uno é um dos produtos de referência e também mais recentes da Arduino, sendo baseado no microcontrolador ATmega328[®]. É um dispositivo open-source que permite a ligação ao computador através de um cabo USB, a alimentação é de 5VDC, e dispensa a instalação de drives no Windows. Tem 14 pinos input/output, 6 pins analógicos de entrada, 6 pinos que permitem programar sinais de saída PWM, e um oscilador de cristal de 16 MHz. [19]

A partir desta informação, torna-se possível compreender que esta placa adequa-se bem ao desenvolvimento de protótipos, dado que disponibiliza condições para ser programada livremente e é de fácil ligação aos diversos componentes externos.

Condicionamento do sinal de atuação

De seguida são explicados os passos efetuados para converter o sinal PWM num valor de tensão entre a 0 a 1 V, isto porque como foi descrito no subcapítulo 3.4.2 o Arduino só possui pinos de saída digitais, e o IC só suporta essa gama de valores de entrada.

Filtro de 1º ordem LP

Implementando um filtro passa-baixo de 1 pólo, é possível converter o sinal PWM de saída num valor de tensão correspondente à percentagem da forma de onda PWM. Desta maneira, consegue-se ter um conversor digital-analógico (DAC) à saída do Arduino.

O funcionamento deste circuito composto por uma resistência e um condensador é simples. Consiste na entrada dos 5V de tensão proveniente do Arduino na resistência, e a partir desse momento o condensador começa a carregar. No momento em que estiver carregado, é interrompido o fluxo de corrente, e a tensão de saída vai corresponder ao valor de tensão de entrada. Tendo em conta que os condensadores bloqueiam as correntes DC, mas deixam passar as AC, a tensão DC de entrada vai ser igual à tensão de saída, enquanto que a componente de tensão AC em altas frequências vai para o GND. Para baixas frequências a tensão AC vai ser filtrada de acordo com a constante de tempo $\tau = RC$.

Recorrendo à ferramenta gratuita disponível online *OKAWA Electric Design*[®] dimensionou-se a resistência e condensador do filtro passa-baixo de 1º ordem, sendo respetivamente $R=5K\Omega$, e $C=6\mu F$. Sabendo que a expressão da frequência de corte e tensão de ripple são iguais a:

$$f_c = \frac{1}{2 \times \pi \times R \times C} \quad (3.7)$$

$$V_{ripple\ p-p} = \frac{V_{rect}}{2 \times R \times C} \quad (3.8)$$

Então, obtém-se $f_c = 5,3 \text{ Hz}$, e $V_{ripple \text{ p-p}} \approx 0,166 \text{ V}$. Que são valores adequados para o objetivo pretendido de ter um sinal de tensão correspondente ao duty cycle do sinal PWM, com reduzida oscilação e tempo de resposta baixo (é igual a 0,03s).

Divisor de Tensão

Dado que já se possui o sinal PWM em valor de tensão, e tendo em conta que a entrada do IC é analógica e apenas suporta valores entre os 0-1V, é necessário aplicar um divisor de tensão, de maneira a fornecer o offset necessário.

A relação entre as duas resistências é de 1:2,5 (uma vez que o sinal apresenta à saída do filtro 3,5V), e também foi considerado o facto de não utilizar resistências de valor muito elevado para evitar o aumento de ruído. Portanto, sabe-se que:

$$V_{saída} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \times V_{entrada} \quad (3.9)$$

Então, assumindo um $R_3 = 1 \text{ K}\Omega$ e um $R_2 = 2,7 \text{ K}\Omega$ ter-se-á uma tensão de saída de no máximo 1V.

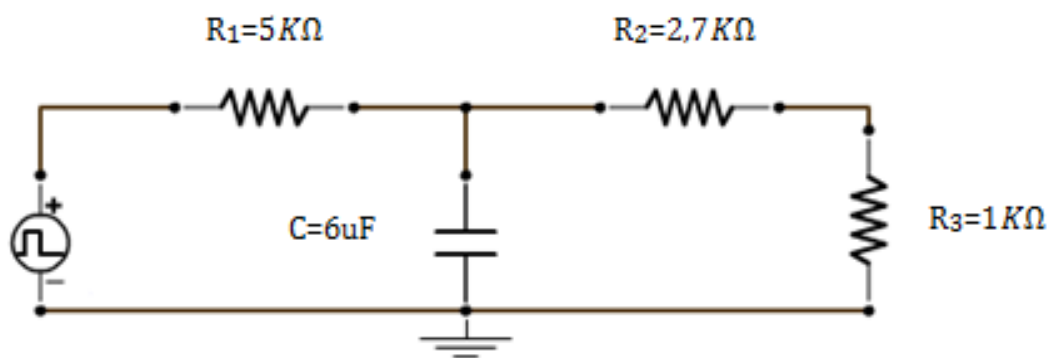


Figura 3.17 – Filtro LP + divisor tensão.

IC controlo de PWM por tensão

Em primeiro lugar, é fundamental justificar a existência deste circuito integrado no projeto. Isto porque, o Arduino Uno que foi apresentado no subcapítulo 3.4.2.1 possui 6 pinos de saída PWM, cuja frequência do sinal de saída é de 500Hz (a função `analogWrite` produz essa frequência, mas não existe qualquer controlo sobre esse valor). Essa frequência pode ser ajustada através da programação de prescalers que consoante os valores que assumem são utilizados para dividir a frequência de 16 MHz do clock interno do Arduino. Através deste método existe a desvantagem de existirem valores fixos de prescaler, que logo à partida condicionam a gama de valores de frequência de saída que se podem obter.

Outra alternativa consistia em programar diretamente os timers e registos internos do Arduino UNO. No entanto, verificou-se que a utilização de timers não era aconselhável, uma vez que se estava a exigir ao controlador central (arduino), que deve gerir o sistema, para também gerar sinais PWM.

Portanto, a solução implementada consiste em através dos joysticks serem invocadas funções de direção e velocidade, conforme a posição dos joysticks, gerando referências em sinal analógico com determinados valores de tensão. Esses valores vão entrar no IC, e consequentemente definir o duty cycle do sinal de saída.

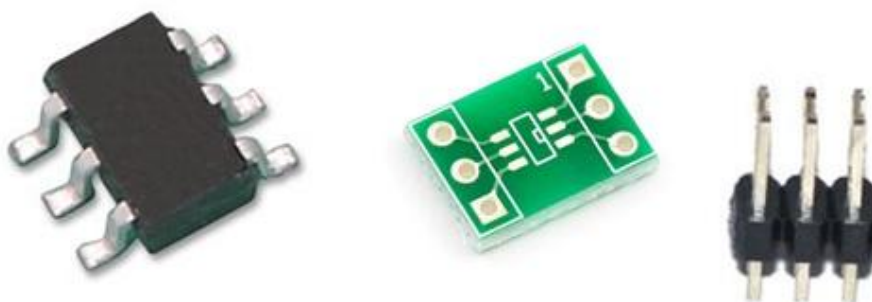


Figura 3.18 – IC e adaptador.

O IC Voltage-Controlled PWM escolhido foi o *LTC6992-3*[®], devido ao facto dos 4 modelos existentes ser aquele que estava limitado a um duty cycle de 96%, e a driver (será abordada no subcapítulo 3.4.3) não pode receber um sinal PWM com duty cycle superior a esse valor (as restantes características são iguais aos outros modelos). A segunda especificação importante a destacar está relacionada com o facto de ter um único pino de entrada, em que a tensão de entrada está limitada entre 0 a 1V. [20]

Tendo em conta que o IC não tem terminais para ligar à breadboard, necessita do adaptador SOT23-6. As características do adaptador estão relacionadas com a dimensão e número de pinos de encaixe. Daí ter-se comprado o SOT23 – 6, em que SOT23 é o package case (corresponde às dimensões (2mm x 3mm) do IC), e o 6 é igual ao número de pinos.

Dimensionamento do IC

Previamente ao dimensionamento do IC Voltage-Controlled PWM é necessário tomar uma decisão quanto ao valor da frequência desejada. Sabendo *a priori* que o motor escolhido é elétrico de corrente contínua, então segundo [21] é aconselhado como regra geral utilizar uma frequência a rondar os 20KHz.

Os problemas inerentes às baixas frequências do sinal PWM estão relacionados com o facto de motores de corrente contínua com potência na ordem dos 200W e 24V, apresentarem valores de indutância nos enrolamentos da armadura nas unidades de mH. Ou seja, são necessárias frequências mais elevadas para reduzir o ripple da corrente, uma das fontes da perda de potência e dissipação de energia por calor.

Os novos sistemas funcionam perfeitamente no intervalo 16KHz a 20KHz, estando esta gama de valores situada acima do limite de audível e também não danifica o motor.

Na figura abaixo está representado o IC com a legenda de cada um dos 6 pinos, de forma a ser mais acessível de acompanhar os cálculos relativos ao dimensionamento do IC para obter uma frequência entre os 16KHz e os 20KHz.

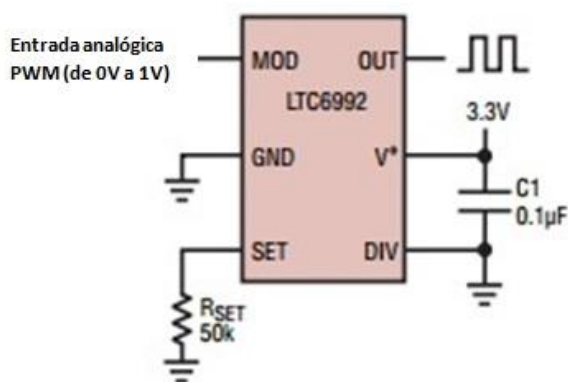


Figura 3.19 – IC Voltage-Controlled PWM.

Na página 1 do datasheet [20] está indicado o intervalo que o duty cycle gerado pode variar, que no caso desta versão LT6992-3 encontra-se entre os 0%-95%. Entre as quatro versões apresentadas na tabela abaixo, foi esta a escolhida, uma vez que a driver que irá receber este sinal PWM, e nas suas especificações declarado que esse sinal não pode possuir um duty cycle superior a 96%.

Tabela 3.6 – Quatro versões de duty cycle mínimo e máximo.

Nome do componente	Intervalo do duty cycle
LT6992-1	0 a 100%
LT6992-2	5% a 95%
LT6992-3	0% a 95%
LT6992-4	5% a 100%

Como tal, aplicando uma tensão entre 0V a 1V no pino de entrada ‘MOD’ vai se obter um sinal PWM com um duty cycle que pode variar entre 0%-95%.

Nas características elétricas do LT6992-3 está escrito que a tensão de alimentação V^+ pode ir de 2,25V a 5,5V (apesar de na figura estar representado 3,3V, na figura 4.2 do esquema geral pode-se visualizar que foi alimentado a partir do pino de 5V do Arduino Uno). Também está indicado o intervalo do valor do pino da resistência R_{set} , sendo o mínimo igual a 50 K Ω e o máximo igual 800K Ω . Seguidamente é apresentada a expressão para calcular o R_{set} :

$$R_{set} = \frac{1MHz \times 50K}{N_{DIV} \times F_{OUT}} \quad (3.10)$$

No que diz respeito à escolha do valor divisor de frequência interna (1 MHz) do IC LT6992-3 N_{DIV} é escolhido de acordo com a expressão apresentada abaixo, e que consequentemente determinará a frequência do sinal de saída:

$$\frac{62,5KHz}{F_{out}} \leq N_{DIV} \leq \frac{1MHz}{F_{out}}$$

Querendo uma frequência F_{out} entre os 16KHz e os 20KHz, daqui adiante os cálculos do dimensionamento serão efetuados para $F_{out} = 18KHz$. Consultando a tabela da programação do DIVCODE, obtém-se o valor $N_{DIV} = 4$.

Neste momento, é possível calcular o valor exato de Rset:

$$R_{set} = \frac{1MHz \times 50K}{4 \times 18KHz} \approx 694 K\Omega$$

Desta maneira têm-se todos os dados necessários para ter um oscilador PWM de 18KHz.

Comando

Uma vez que cada IC LT6992-3 possui um único pino de saída, através de um comando constituído por dois relés, é possível apenas com dois circuitos integrados (em vez de quatro), que os dois motores do lado esquerdo e direito rodem em diferentes sentidos e velocidades.



Figura 3.20 – Relé.

Tem-se também dois transístores de potência cuja função consiste em funcionarem como interruptores para acionar os relés. Dado que os relés apresentam cargas indutivas, são adicionados a esta montagem díodos de roda livre, de forma a proteger o IC LT6992-3 e o Arduino das correntes inversas que são geradas no momento em que os relés são desligados.

3.4.3 Módulo de potência

Após um estudo de mercado das drivers existentes, que teve especial atenção ao preço e compatibilidade com o microcontrolador e motores comprados, foi escolhida a *Arduino brush motor driver module single full-bridge*[®]. Além do preço, os principais fatores que levaram à sua escolha são: a driver foi fabricada para ser ligada ao Arduino; e cumpre todas as especificações do motor, em termos de tensão (24V), corrente (rated current = 40A e peak current = 80A) e de ser própria para o Brush DC Motor.

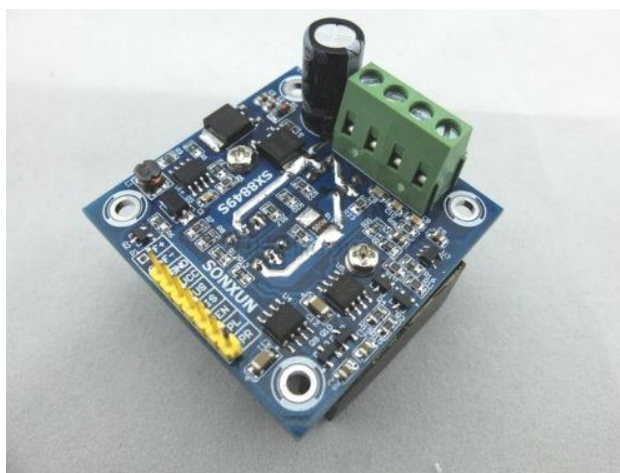


Figura 3.21 – Driver.

Na Tabela 3.7 estão apresentadas as principais especificações da driver.

Tabela 3.7 – Principais características da driver.

Tensão de Funcionamento	15 ~ 24V
Corrente nominal/pico	40A/80A
Arquitetura	Transistor N-MOS, single full-bridge
Sinal de entrada PWM: duty cycle	0 ~ 96%, standard 16KHz
Corrente de alimentação	0 ~ 91A

3.4.4 Módulo Atuadores

O módulo atuadores é composto pelo conjunto: quatro motores com as respectivas caixas de engrenagens, as correntes e as rodas do VUMU. De seguida serão apresentadas as duas características, e os cálculos efetuados para se obter o binário total do veículo.

Motores

Uma vez que se pretende construir um controlador para quatro motores, todos eles com as mesmas características, é necessário conhecer estas muito bem visto que todo o trabalho será baseado neste conjunto de dados. O motor em estudo é o *24V 250W Electric Motor W/Gear 9T Sprocket[®]*, que se apresenta na Figura 3.22.



Figura 3.22 – Motor CC de magnetos permanentes com escovas.

No subcapítulo 2.1, foi efetuada uma comparação das vantagens e desvantagens de 3 tipos diferentes de motores, tendo sido escolhido o motor CC com escovas. Pese embora, inicialmente ainda se usou o motor passo-a-passo, este foi posteriormente excluído por se entender que o controlo de velocidade neste trabalho era mais importante que o controlo de posição. No que diz respeito à decisão tomada na escolha entre o motor CC com escovas e sem escovas teve essencialmente relacionada com a diferença entre preços. Visto que se está a trabalhar na construção de um protótipo, o motor CC com escovas apesar de ter um período de vida mais curto, não se justificava o gasto em motores sem escovas bastante mais dispendiosos.

Seguidamente são apresentadas as principais características do motor:

- Tensão: 24 V;
- Potência: 250 W;
- Corrente nominal: 18.7 A;
- Velocidade nominal: 3000 RPM;
- Binário: 1.11 N.m;
- Dentes: 9;
- Rácio de redução: 9,78:1.

De notar que o motor já possui uma caixa de engrenagens incorporada, e está preparado para serem acrescentadas correntes que ainda vão conferir-lhe um maior valor de binário.

Correntes

Na Figura 3.23 está representado o conjunto motor, corrente e roda. Pretende-se explicar os cálculos, e a influência que este componente tem no valor final do binário. De salientar que as correntes utilizadas são do tipo 06B-1, normas DIN 8187 e ISSO 606.

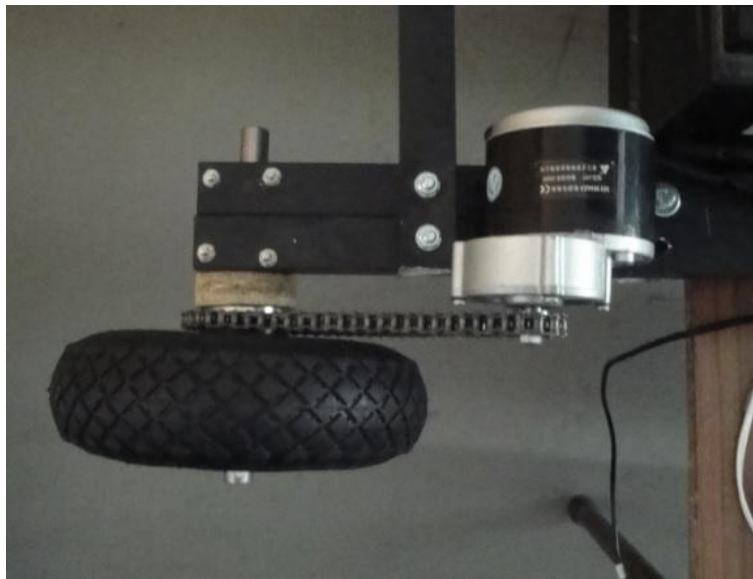


Figura 3.23 – Correntes.

Primeiramente, o pinhão do motor foi alterado para ter 11 dentes, em vez de 9 como chegou encomendado do fabricante, de forma a estar adaptado às correntes. Em relação ao canhão da roda, possui 27 dentes. No caso particular de engrenagens com rodas dentadas o rácio de redução vai ser igual à divisão dos dentes do canhão da roda pelos dentes do canhão do motor, e como tal o binário de cada roda vai ser igual a:

$$T_{roda} = T_{motor} \times \text{rácio de redução} \times \frac{27}{11} \approx 26,7 \text{ N.m}$$

Em suma, no subcapítulo 3.3 os cálculos efetuados indicavam que seria necessário ter um motor com uma potência de cerca de 170W, e um binário de aproximadamente 16 N.m. O motor comprado tem 250W e um binário de 26,7 N.m, cumprindo os requisitos necessários para a cadeira de rodas se movimentar.

Rodas

Foram utilizadas rodas insufláveis de borracha com um diâmetro igual a 250mm e 60mm de largura.



Figura 3.24 – Roda.

3.4.5 Alimentação do Sistema de Acionamento Eletrónico

O circuito de alimentação do SAE é composto por duas baterias e um conversor DC. Tendo em conta o consumo das drivers (24V) e do microcontrolador Arduino (5V), seguidamente serão descritas as especificações destes dois componentes responsáveis por fornecer a tensão de alimentação necessária para alimentar o SAE.

Baterias

Sabe-se que a bateria contém energia armazenada sob a forma de um potencial eletroquímico. Essa energia elétrica vai ser fornecida a um motor elétrico e, posteriormente, o motor irá converter a energia recebida em energia mecânica possibilitando o movimento da viatura.

Foram utilizadas baterias comuns de automóvel do tipo ácido-chumbo com 12V de tensão, com capacidade de 60Ah e baixo peso de forma a manter um bom nível de energia.



Figura 3.25 – Bateria de Ácido-chumbo.

As baterias de carro podem ser utilizadas em diferentes combinações série/paralelo para controlo da velocidade e força do veículo. No caso concreto deste trabalho as duas baterias foram utilizadas em série alimentando o SAE com 24V.

Conversor DC

Devido a questões práticas o Arduino UNO não podia estar ligado ao PC é, então, necessário um conversor que ajuste a tensão de 12V da bateria para 5V, que corresponde ao valor de alimentação do Arduino.



Figura 3.26 – Conversor DC/DC.

Na Figura 3.26 tem-se o conversor LM2596 que consegue fazer o drive da corrente até 3 amperes, a tensão de entrada está limitada a 40V, e a tensão de saída pode variar entre 1.2V a 37V. [22]

Capítulo 4. Implementação do sistema

No capítulo anterior foi apresentado o estudo teórico, os dimensionamentos e a análise efetuada previamente à escolha dos componentes que compõem o SAE. No presente capítulo vai-se proceder aos testes, à explicação detalhada do funcionamento do sistema. Além disso, faz-se também referência às principais dificuldades encontradas ao longo da sua implementação.

Com recurso à visualização da Figura 4.1, é possível constatar o protótipo do SAE. Posteriormente, descrever-se-á com o máximo de propriedade possível, a montagem de cada componente, sendo utilizados fluxogramas e outras ferramentas de algoritmo de controlo, de modo a tornar flagrante a constituição do protótipo em questão.

No final deste capítulo será ainda exemplificado, com recurso ao *Matlab*[®], as trajetórias que se esperam obter nos ensaios finais, tendo em conta todas as características do VUMU que foram abordadas no capítulo 3 e 4, sendo ainda efetuado um estudo comparativo com os resultados experimentais.

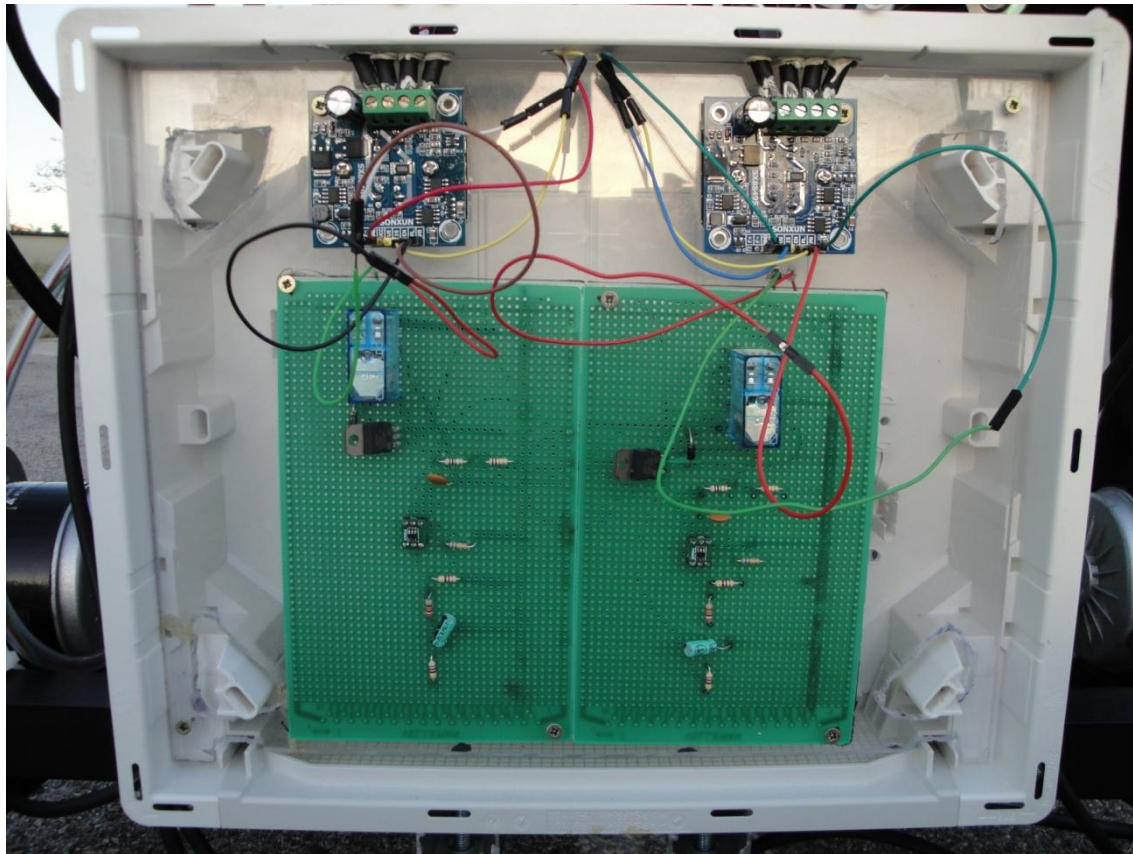


Figura 4.1 – Protótipo do SAE.

4.1 Protótipo do sistema

Na Figura 4.2 está representado o esquema de ligações dos componentes que constituem o SAE, cujas especificações dos principais blocos já foram apresentadas anteriormente.

De forma a simplificar a análise do circuito, este foi dividido em várias partes, facilitando também o acompanhamento da evolução dos sinais ao longo das mesmas.

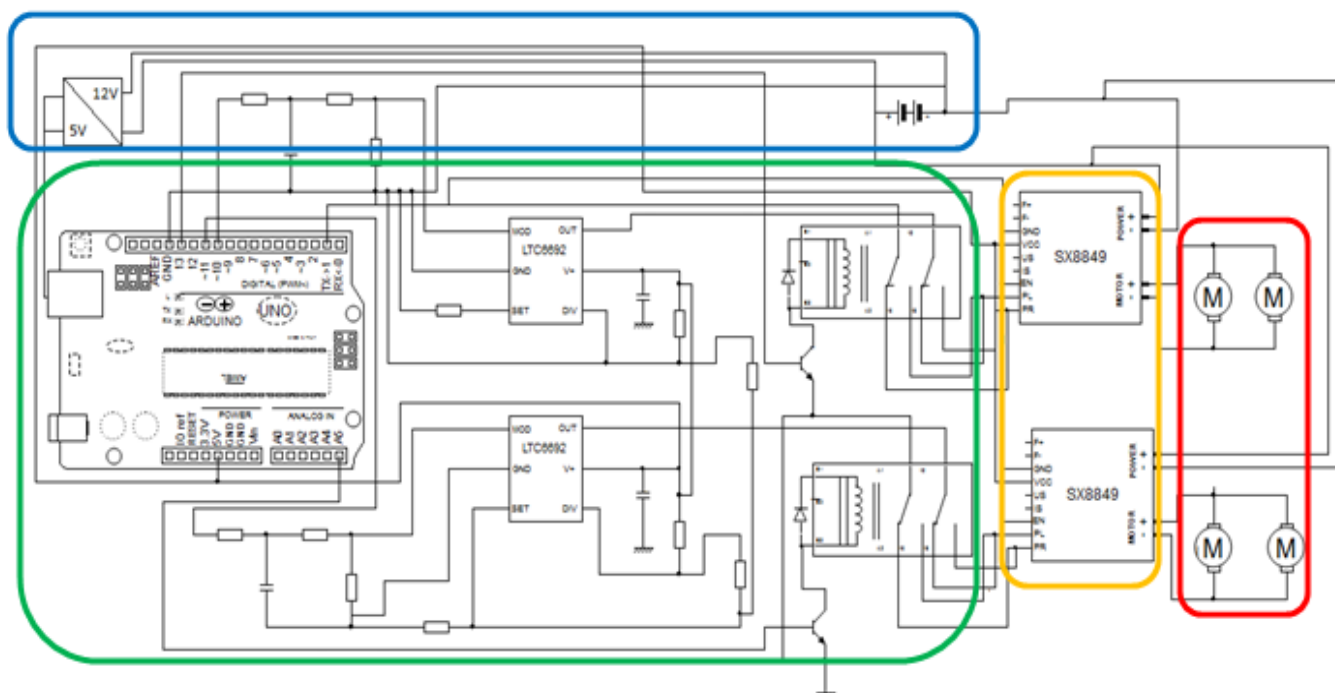


Figura 4.2 – Esquema geral de ligações dos componentes do SAE.

Com o intuito de facilitar a compreensão do esquema geral de ligações dos componentes, cada um dos quatro blocos do SAE está a ser evidenciado por uma cor própria. Apresentando sequencialmente os diferentes módulos, desde a fonte onde são gerados os sinais até ao seu destino. Em primeiro lugar, sublinha-se o módulo de controlo (neste esquema não está representada a interface, i.e, os joysticks) a verde. Depois, tem-se o módulo de potência sublinhado a amarelo e os atuadores a vermelho. Por fim, realça-se o módulo de alimentação, a azul (baterias e conversor).

Portanto, em termos gerais o conjunto dos módulos interface e de controle fornece informação, sob a forma de dois sinais PWM de frequência 18KHz, ao módulo de potência (que é alimentado pelas baterias) para gerar energia elétrica. O módulo atuadores recebe essa energia elétrica e converte-a em energia mecânica.

4.2 Testes ao conjunto interface e módulo de controle

Primeiramente, será ilustrado o funcionamento do joystick linear de forma a tornar-se mais perceptível a interpretação das imagens e valores obtidos. Este componente da interface está ligado ao pino analógico A0 do Arduino.

Controlo de velocidades:

O controlo de velocidade é realizado pelo joystick representado na Figura 4.3 (consultar o subcapítulo 3.4.1). Este joystick permite estabelecer 5 posições diferentes: a posição P0 é a posição em que a velocidade é insuficiente para as rodas se moverem e, consequentemente a cadeira de rodas está parada. A posição P4 é a posição que representa a situação em que cadeira deve andar à velocidade máxima.



Figura 4.3 – Joystick de velocidade.

A figura 4.4 mostra os componentes que são responsáveis por gerar o sinal PWM, necessário para os motores rodarem.

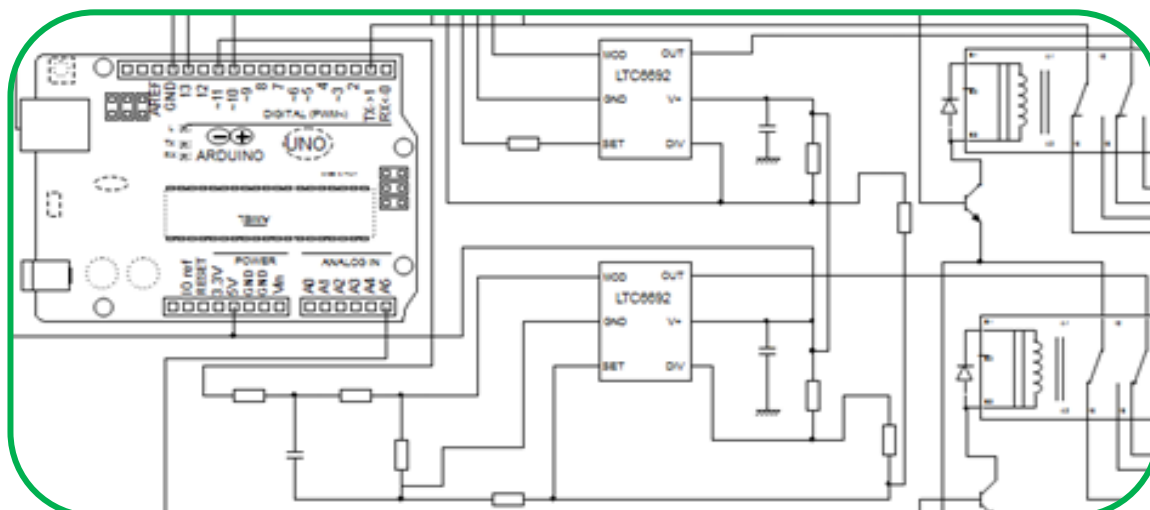


Figura 4.4 – Componentes do módulo de controlo.

Dado que já foram descritas as especificações e explicados os cálculos dos dimensionamento de todos os componentes envolvidos no capítulo 3, neste subcapítulo pretende-se apresentar os resultados observados no osciloscópio.

Sinal de saída do conjunto Interface e Arduino

Nas figuras abaixo estão ilustrados sinais PWM de diferentes duty cycle, conforme a posição do joystick de velocidade. A destacar o valor de frequência que se mantém sempre próximo dos 500 Hz (frequência de saída dos pinos digitais do Arduino UNO), e o valor de tensão média que vai aumentando, tal como foi abordado no subcapítulo 2.4, consoante o incremento do duty cycle.

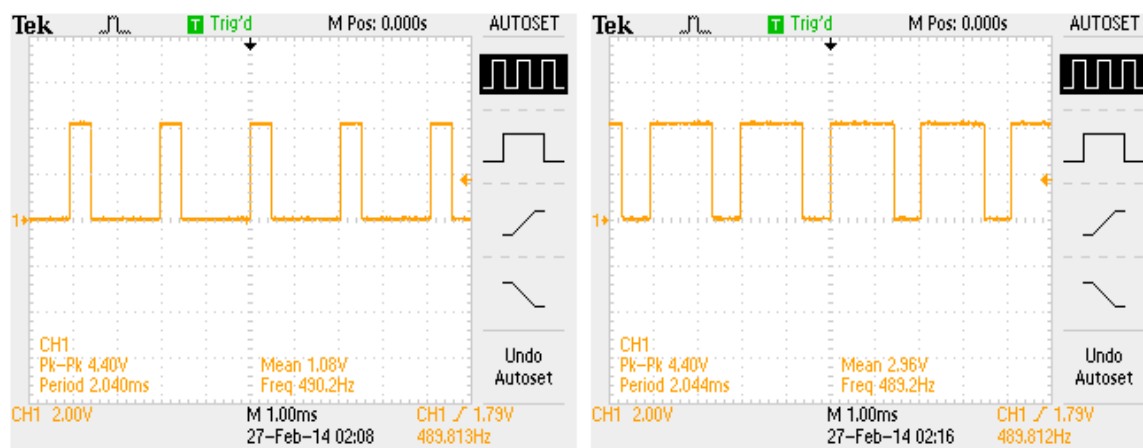


Figura 4.5 - Sinal PWM do Arduino com duty cycle = 20% e 70%.

Na Tabela 4.1 é possível visualizar os valores de tensão correspondentes a cada duty cycle:

Tabela 4.1 – Valores de saída do conjunto interface e Arduino.

Posição do joystick	Duty Cycle (%)	Tensão (V)
P0	≈20	1
P1	≈40	1,7
P2	≈52	2,3
P3	≈70	3
P4	≈90	4

Sinal de saída do conjunto Interface, Arduino e filtro LP

Nesta situação pretende-se converter o sinal em tensão correspondente à percentagem da forma de onda PWM, como já foi abordado no sub-capítulo 3.4.2. Acrescentado um filtro passa-baixo de primeira ordem, é possível obter um conversor digital-analógico (DAC) no pino digital do Arduino.

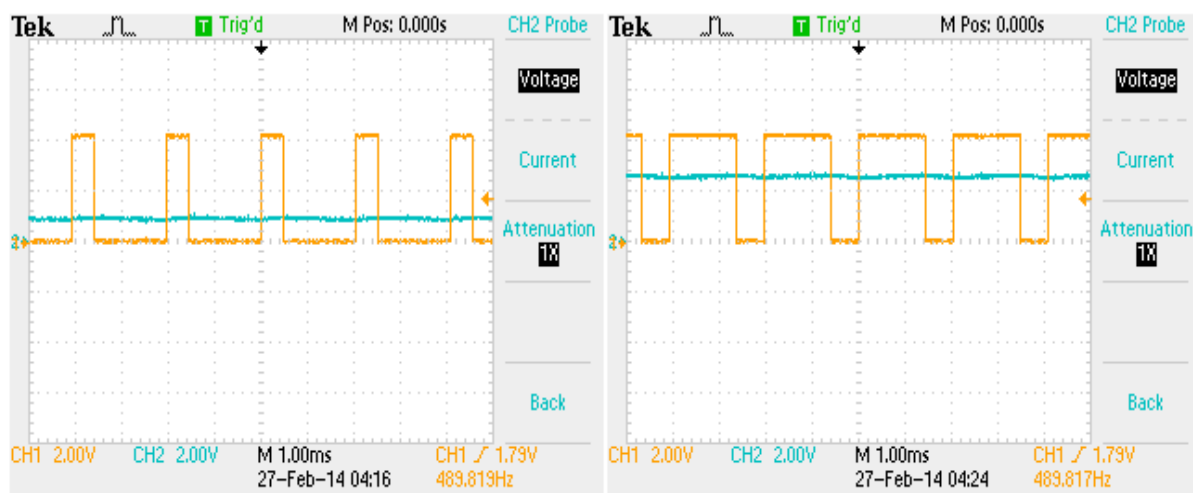


Figura 4.6 – Sinal de saída do filtro com duty cycle = 20% e 70%.

Tabela 4.2 – Valores de saída do conjunto Interface, Arduino e filtro.

Posição do joystick	Duty Cycle (%)	Tensão (V)
P0	≈20	1
P1	≈40	1,5
P2	≈52	2,1
P3	≈70	2,7
P4	≈90	3,5

De notar que o filtro introduziu um ganho negativo, que se reflete num decréscimo do valor da tensão comparativamente com os resultados da tabela anterior.

Sinal de saída de conjunto Interface, Arduino, filtro LP e divisor de tensão

Nesta situação, tal como foi explicado no subcapítulo 3.4.2.2, o objetivo consistiu em adicionar um divisor de tensão em série com o filtro, de forma a limitar o sinal de saída a uma amplitude máxima de tensão de 1V.

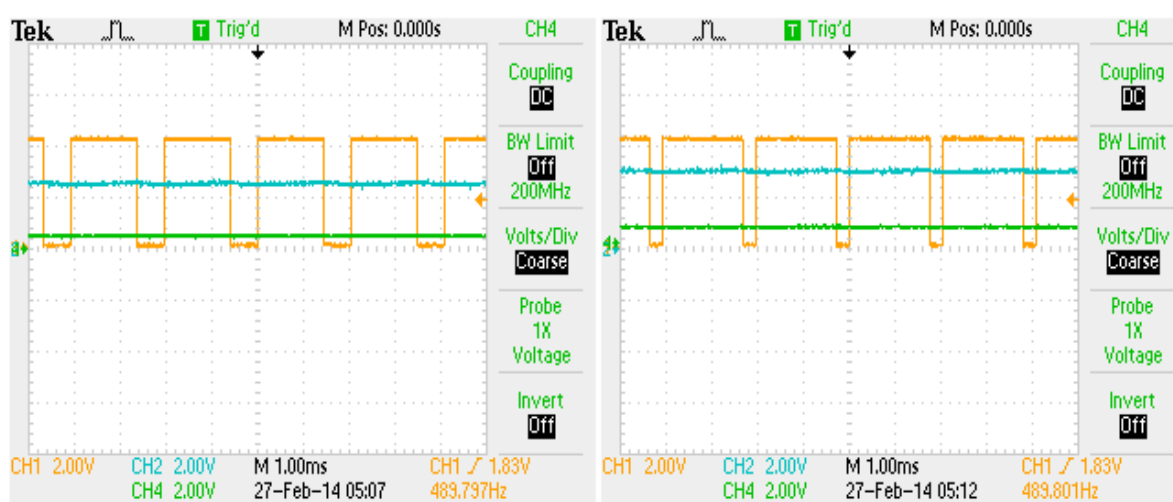


Figura 4.7 – Sinal de saída do divisor de tensão com duty cycle = 70% e 91%.

Tabela 4.3 – Valores de saída do conjunto Interface, Arduino, filtro e divisor de tensão.

Posição do joystick	Duty Cycle (%)	Tensão (V)
P0	≈20	0,15
P1	≈40	0,36
P2	≈52	0,48
P3	≈70	0,66
P4	≈90	0,87

Apesar de os dimensionamentos terem sido efetuados para apresentar no máximo 1 V à saída, devido às incertezas associadas a qualquer resistência, percebe-se a partir dos valores de tensão apresentados na tabela, que ocorreu uma ligeira atenuação destes.

Sinal PWM de frequência 18 KHz

Nas seguintes imagens pode-se confirmar a obtenção de um sinal PWM de 18KHz com diferentes valores de duty cycle.

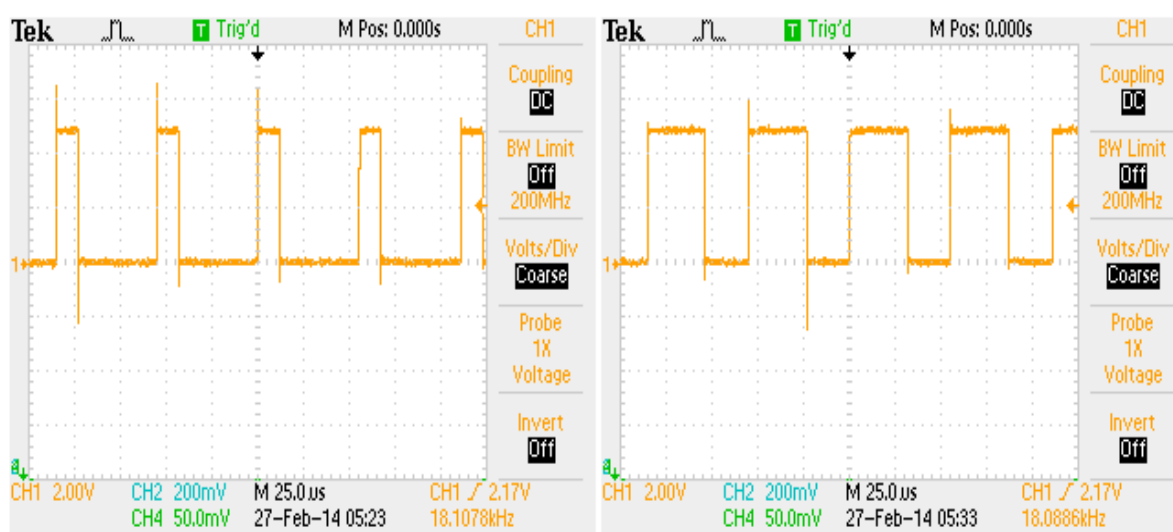


Figura 4.8 – Sinal PWM de frequência de 18 KHz com duty cycle de 20% e 70%.

Tabela 4.4 – Valores de saída do IC.

Posição do joystick	Duty Cycle (%)	Tensão (V)
P0	≈20	0,73
P1	≈40	1,7
P2	≈52	2,35
P3	≈70	3,25
P4	≈90	4,4

4.3 Relés, Transistor, Díodo e módulo de potência

Neste subcapítulo é representado na Figura 4.9 como são feitas as ligações entre o IC LT6992-3, a driver e os motores. O IC LT6992-3 gera o sinal PWM que excita o relé 1 p.e, e dependendo de onde esse sinal é reencaminhado (se na entrada da driver PL ou PR), os dois motores de um lado (esquerdo ou direito) rodam no sentido CW ou CCW.

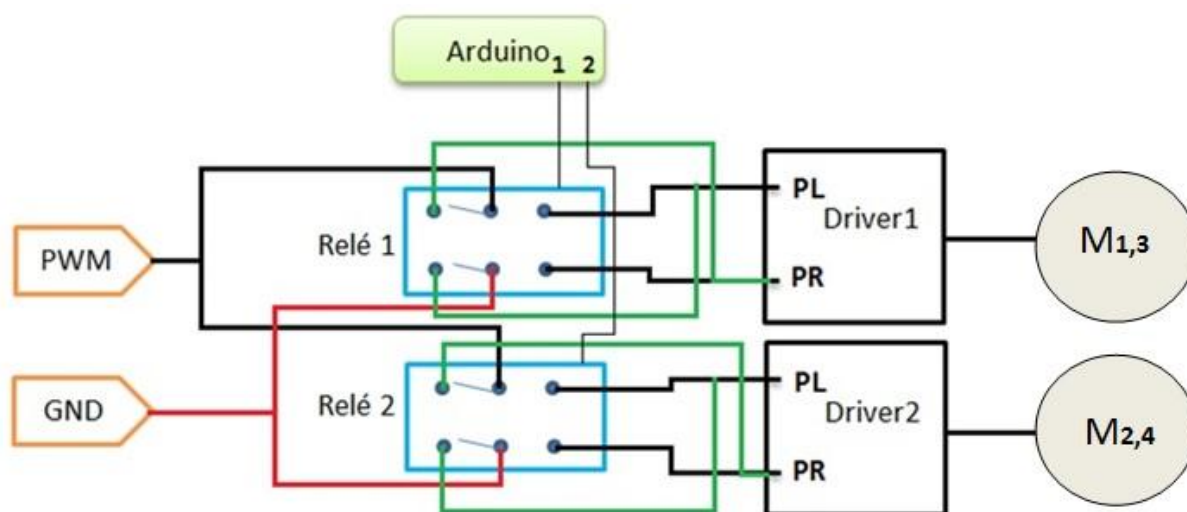


Figura 4.9 – Esquema de ligações entre o comando e o módulo de potência.

Na Tabela 4.5 está apresentado o funcionamento do esquema de ligações representado acima.

Tabela 4.5 – Funcionamento do esquema de ligações entre o comando e o módulo de potência.

Sinal 1	Sinal 2	Relé 1	Relé 2	D1-PL	D1-PR	D2-PL	D2-PR	M _{1,3}	M _{2,4}
LOW	LOW	Normalmente aberto	Normalmente Aberto	GND	PWM	GND	PWM	Horário	Horário
HIGH	HIGH	Fechado	Fechado	PWM	GND	PWM	GND	Anti-horário	Anti-horário
HIGH	LOW	Fechado	Normalmente Aberto	PWM	GND	GND	PWM	Anti-horário	Horário
LOW	HIGH	Normalmente aberto	Fechado	GND	PWM	PWM	GND	Horário	Anti-horário

4.4 Algoritmo de Controlo dos motores

Tendo em conta que o veículo possui uma direção skid steering, e que o sinal PWM está a entrar na driver com a frequência desejada, o passo seguinte consiste em programar o microcontrolador de forma a servir de intermediário entre as instruções dadas pelos joysticks e os motores, ajustando assim a sua velocidade e sentido de rotação.

As linhas de código abaixo representam a estrutura criada para definir cada um dos 8 sentidos das 4 direções.

```
enum ESTADO {  
    FRENTE,  
    FRENTE_DIREITA,  
    FRENTE_ESQUERDA,  
    DIREITA,  
    ESQUERDA,  
    TRAS_DIREITA,  
    TRAS_ESQUERDA,  
    TRAS  
};  
ESTADO variavel_estado;
```

Cada um dos estados está associado às posições do joystick, e o seu funcionamento genérico é descrito abaixo com o auxílio de uma figura. Posteriormente, com recurso a um fluxograma, é apresentado o algoritmo de controlo.

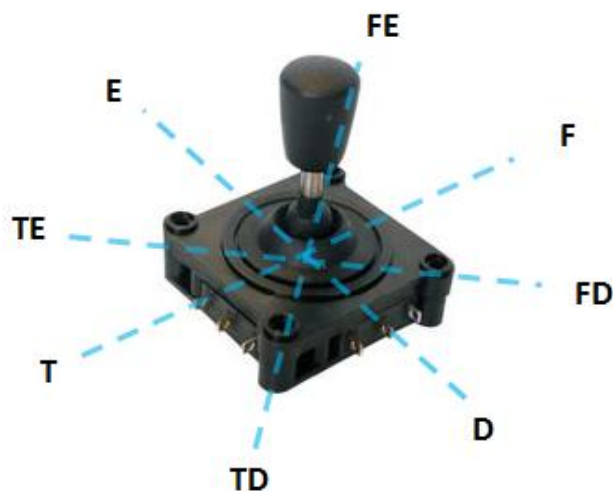


Figura 4.10 – Joystick de direção.

Controlo de direções do VUMU em andamento

- **F** - É o estado frente, onde o veículo deve andar em frente porque tem as duas rodas a andar a uma velocidade igual;
- **T** - É o estado trás, onde o veículo deve andar para trás porque tem as duas rodas a andar a uma velocidade igual com sentido contrário ao da direção da cadeira;
- **FD** - É o estado frente direita em que permite o veículo curvar, diminuindo a velocidade das rodas do lado direito em aproximadamente 20%;
- **D** - É o estado direita em que permite o veículo curvar, diminuindo a velocidade das rodas do lado direito em aproximadamente 40%, e as rodas do lado esquerdo em cerca de 20%.

Relativamente aos restantes estados a lógica é idêntica, pois diferem apenas no sentido de rotação dos motores. Assim, omitiu-se a sua descrição (FE, E, TD e TE).

No que diz respeito ao deslocamento do VUMU a partir do repouso, a lógica é naturalmente diferente, uma vez que a velocidade está a ser incrementada. Além disso o sentido de rotação dos motores também sofre alterações, nomeadamente na direção da direita e esquerda. A tabela abaixo sintetiza todos os casos:

Tabela 4.6 – Sentido das rodas, de acordo com as diferentes direções.

Movimento	Rodas da esquerda	Rodas da direita
Virar à direita	CCW	CW
Virar à esquerda	CW	CCW
Frente	CW	CW
Trás	CCW	CCW
Frente direita	CW	CW
Frente esquerda	CW	CW
Trás direita	CCW	CCW
Trás esquerda	CCW	CCW

De notar que, com os dois joysticks a funcionar em conjunto, é possível obter 32 combinações de comandos diferentes para o sistema.

Neste capítulo, ainda vão ser simuladas e testadas algumas das mais importantes combinações.

Primeiramente, tal como acontece com o joystick de direção que invoca determinadas funções conforme a sua posição, o joystick da velocidade funciona como um potenciómetro em que consoante a sua posição, a função representada abaixo devolve diferentes valores.

```
int readVelocidade(){  
    return (analogRead(inputPin) / 4); // read from the sensor  
}
```

As diferentes posições do joystick fazem variar a tensão aproximadamente entre 0,5V-5V. Esta tensão representa a tensão analógica que está a ser lida como input. O Arduino tem um circuito interno denominado conversor analógico-digital, que lê os valores de tensão e converte no número equivalente entre 0 a 1023. Ou seja, a função *analogRead()* devolve um número entre 0 a 1023 que é proporcional ao valor de tensão a ser aplicado no pino. Porém, como se pode notar pelas linhas de código acima, esse valor ainda vai ser dividido por 4. Isto porque depois de lido, esse valor vai ser escrito no sinal enviado através da função *analogWrite()*, que suporta apenas um número entre 0 a 255.

Portanto, a função *readVelocidade()* é importante na medida em que o valor que devolve vai ser sempre comparado com o valor atual de velocidade das rodas, incrementando ou decrementando esse número, de acordo com a posição do joystick.

O fluxograma presente na Figura 4.11 diz respeito ao algoritmo implementado no controlo de velocidade e sentido dos motores.

O utilizador indica o movimento desejado aos joysticks, e consoante as posições, estão associados valores desejados de velocidade, do lado direito e esquerdo do VUMU, como se pode visualizar na tabela do terceiro bloco. De acordo com o valor das velocidades desejadas, é efetuada uma comparação com as velocidades de referência, e conforme a condição testada, os motores vão-se mover a determinada velocidade e sentido.

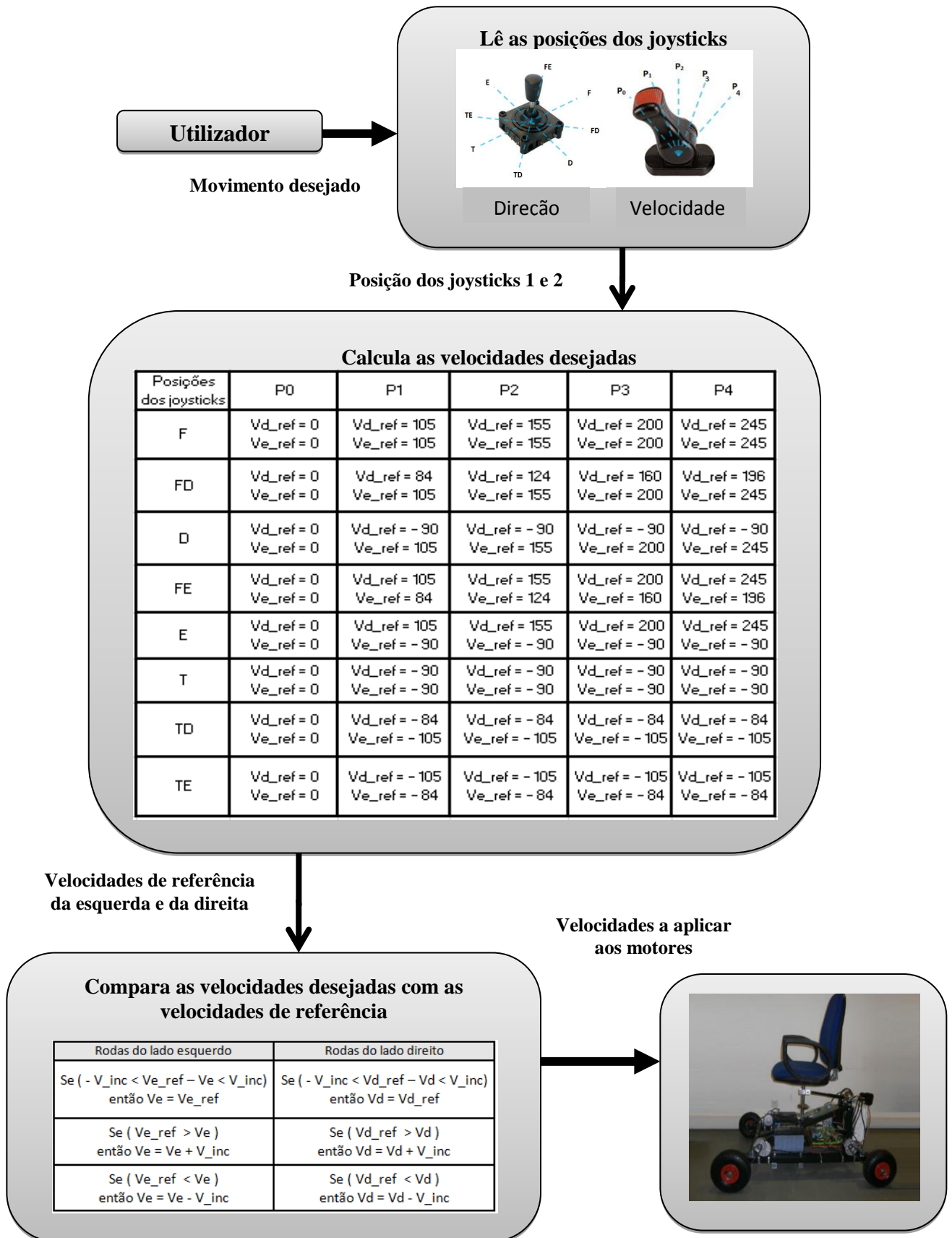


Figura 4.11 – Fluxograma do algoritmo de controlo.

4.5 Modelo da trajetória para sistemas que usam skid steering

Neste subcapítulo pretende-se descrever a trajetória de um veículo equipado com a direção skid steering, recorrendo às equações apresentadas no subcapítulo 2.5.3, que fornecem um modelo elementar para este sistema de acionamento. De acordo com possíveis mudanças na velocidade das rodas, este modelo prevê a trajetória que o veículo efetua.

De um ponto de vista técnico, este método de descrição do movimento é mencionado como uma abordagem cinemática, uma vez que são desprezadas as causas do movimento, e o seu foco está apenas nos efeitos.

4.5.1 Ensaio com joystick e com variação brusca de velocidade (2º)

De seguida, será efetuada a análise a três situações distintas. Na circunstância: frente, frente direita e direita. A partir da referida análise, será possível demonstrar como varia a trajetória, tendo em conta o raio desejado e consoante a velocidade a que o VUMU se desloca.

Combinação 1 – Frente F e Posição P1 -> Frente F e Posição P2

Neste caso, o veículo encontra-se parado, e será acionado na direção frente, com o joystick de velocidade na posição P1 e P2.

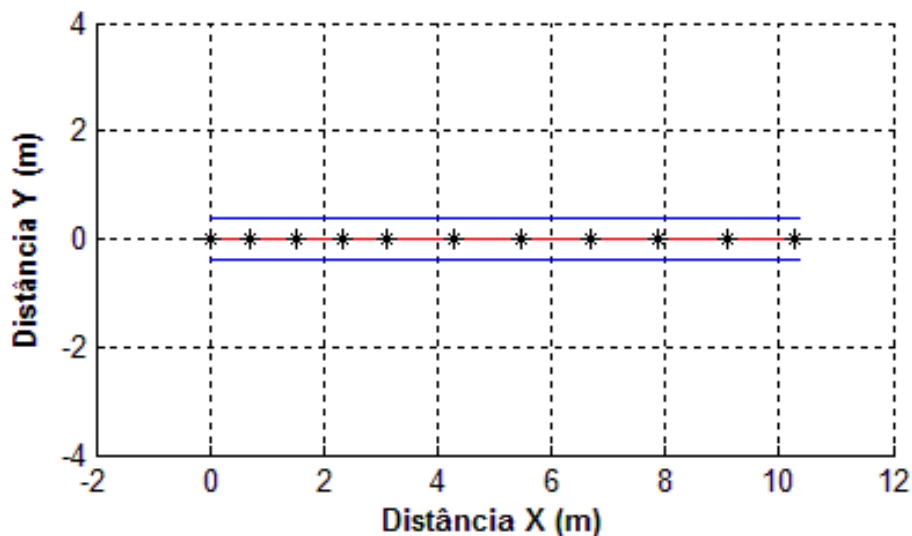


Figura 4.12 – Trajetória linear.

Tabela 4.7 – Valores das variáveis da Combinação 1.

Raio desejado (m)	P_1 (m/s)	P_2 (m/s)	Distância percorrida Y (m)	Distância percorrida X (m)
∞	0,8	1,2	0	10,4

Combinação 2 – Frente F e Posição P2 -> Frente direita FD e Posição P1

Nesta situação em particular, o joystick da velocidade ocupa a posição P2. Observando a Tabela 4.8, verifica-se que a velocidade associada nas quatro rodas é de $1,2 \text{ m.s}^{-1}$. A partir dos 7 metros, regista-se uma diminuição da velocidade nas rodas do lado direito em cerca de 20% ($P1 = 0,8 \text{ m.s}^{-1}$).

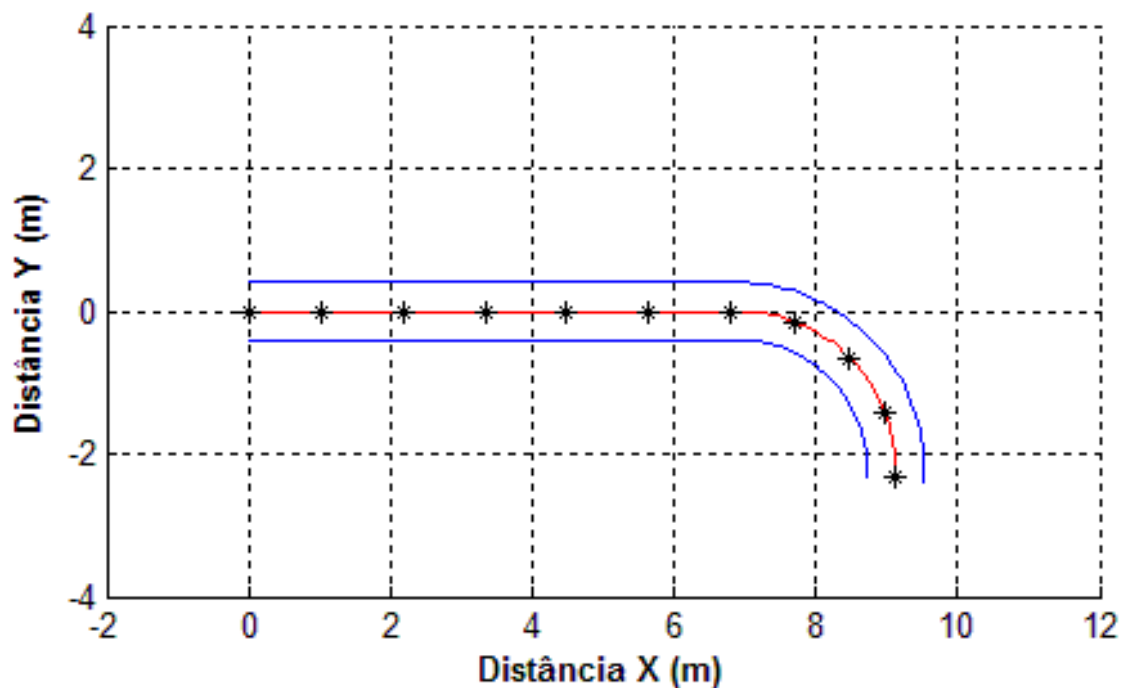


Figura 4.13 – Trajetória frente direita.

Tabela 4.8 – Valores das variáveis da Combinação 2.

Raio desejado (m)	P_1 (m/s) rodas lado direito (X=7m)	P_2 (m/s) rodas lado esquerdo	Distância percorrida Y (m)	Distância percorrida X (m)
2,5	0,8	1,2	-2,5041	9,1216

Combinação 3 – Frente F e Posição P4 -> Frente direita FD e Posição P3 -> Direita

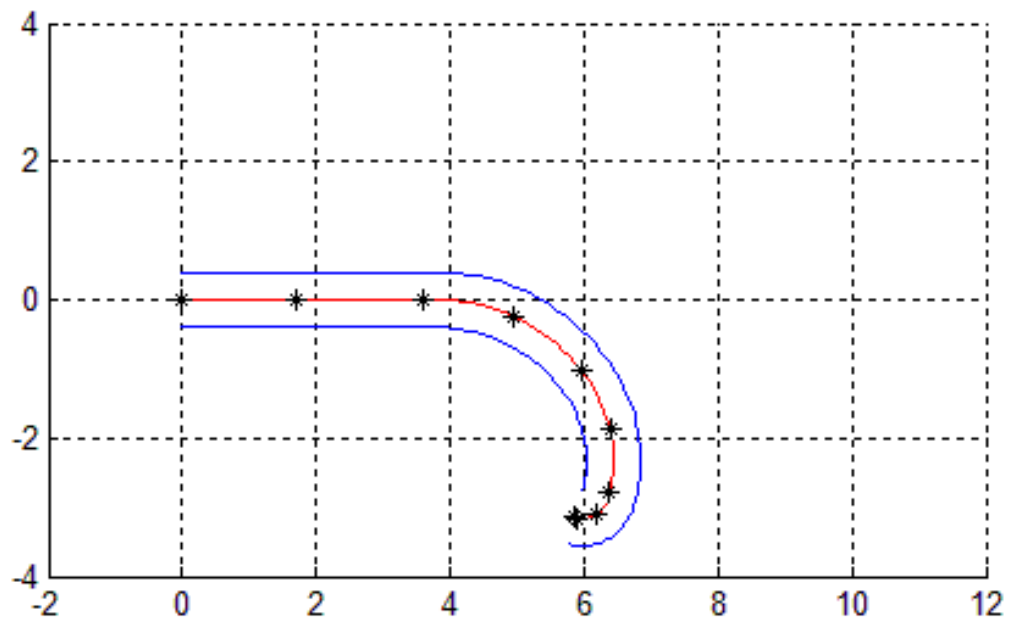


Figura 4.14 – Trajetória direita.

Tabela 4.9 – Valor das variáveis da combinação 3.

Raio desejado (m)	P_1 (m/s) rodas lado direito (X=4m)	P_2 (m/s) rodas lado esquerdo (X=4m)	Distância percorrida Y (m)	Deslocamento em X (m)
≈1,5	1,6	1,2	≈ -3,5	≈ 5,9
	1,2	0,7		
	0,8	0		

Na referida simulação, o objetivo passou essencialmente por demonstrar uma situação que, exigisse uma curva mais acentuada, e que tornasse flagrante a incapacidade da direção FD em contornar um obstáculo.

Neste caso, como foi explicado no subcapítulo 4.4, importa recordar que na direção direita a velocidade das rodas do lado esquerdo diminui em cerca de 20%, e a velocidade das rodas do lado direito sofrem uma diminuição de 40%.

4.6 Ensaaios experimentais

A partir do momento em que o SAE permitiu observar em bancada o controlo dos motores através dos joysticks, e as simulações da trajetórias ficaram concretizadas, foram incorporados os diferentes módulos no chassis da cadeira-de-rodas, dando origem ao protótipo que consta na Figura 4.15.



Figura 4.15 – Protótipo da cadeira de rodas.

4.6.1 Descrição dos Testes

Numa primeira fase, foram realizadas simulações com transições bruscas de velocidade. Em todo o caso, como foi explicitado no subcapítulo 4.4 o algoritmo responsável pelo controlo dos motores, foi implementado na perspetiva de propiciar uma variação de velocidade, aquando da transição entre as diferentes mudanças do joystick.

As razões principais que explicam a referida implementação relacionam-se sobretudo com duas premissas. Em primeiro lugar, obterem-se mudanças de direção mais suaves e, em segundo lugar, a necessidade de proteger o SAE de picos imprevistos de corrente provenientes, apenas a título de exemplo, da transição de uma mudança de velocidade reduzida para uma outra mais elevada.

Os testes foram efetuados para um raio infinito, outro de 4 metros e outro de 6 metros. Os valores de cada uma das três trajetórias foram medidos e, posteriormente, comparados com os valores teóricos. Só assim, se tornou possível analisar a discrepância entre o percurso real e o percurso simulado.

Nas figuras 4.16 e 4.17 estão apresentadas duas perspectivas diferentes da forma como foram medidos os ensaios.



Figura 4.16 – Perspetiva frontal.



Figura 4.17 – Perspetiva traseira.

4.6.2 Raio Infinito

Considerando um ensaio realizado com o joystick da velocidade, na posição P2, e o joystick da direção na posição F, obtiveram-se os seguintes valores:

Tabela 4.10 – Valores medidos para a trajetória de raio infinito.

Eixos	Valores medidos										
X (m)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Y (m)	0	-0.11	-0.2	-0.31	-0.4	-0.49	-0.61	-0.73	-0.81	-0.93	-1.2

Foram medidas as coordenadas de y, tendo como referência o eixo x, ou seja, foi medido o valor de y para cada metro percorrido no eixo x. Foi cronometrado o tempo total do percurso de 10 metros, obtendo-se uma velocidade média de 1.15 m/s que é inferior à velocidade esperada, isto é, 1.2m/s.

Tempo total	8.7 s
Distancia total	10 m
Velocidade média	1.15 m/s

Traçando o gráfico do percurso teórico e do percurso real, obteve-se a seguinte figura:

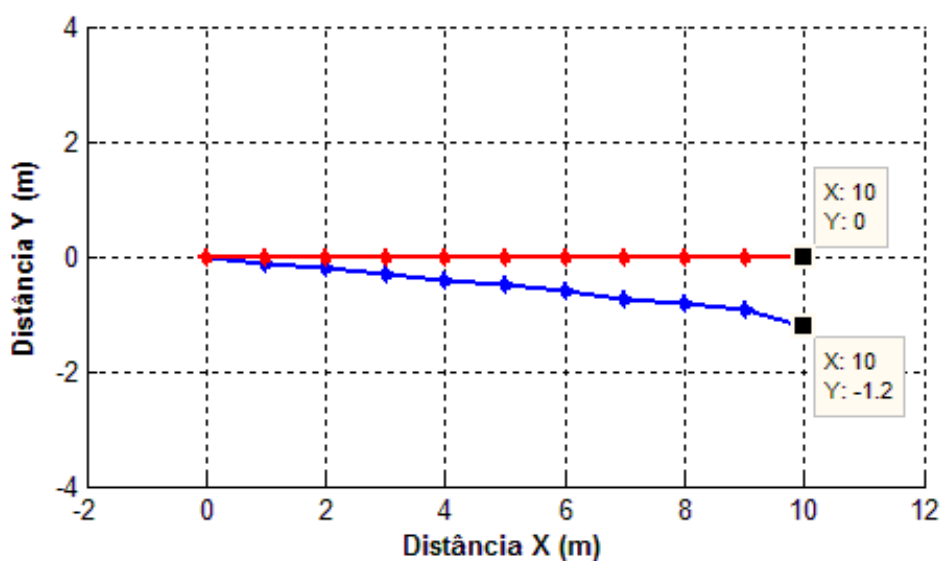


Figura 4.18 – Trajetória linear simulada vs Trajetória linear real.

A partir da visualização da Figura 4.18, constata-se um desvio na trajetória. Num percurso de 10 metros, obteve-se uma diferença final de 1.2 m em relação ao eixo y. Isto deve-se ao facto da estrutura não estar perfeitamente calibrada e não existirem sensores de velocidade nas rodas.

Ter também em conta que devido ao sistema de comando, o controlo dos dois motores de um lado é efetuado apenas com um controlador. Tendo em conta que a potência segue pelo caminho de menos resistência, rodas do mesmo lado vão possuir velocidades ligeiramente diferentes.

4.6.3 Raios de 4m, 6m

O cenário onde se realizaram os testes experimentais da trajetória do VUMU para curvas de raio igual a 4 e 6 metros utilizando a mesma velocidade pode ser visto na Figura 4.19.

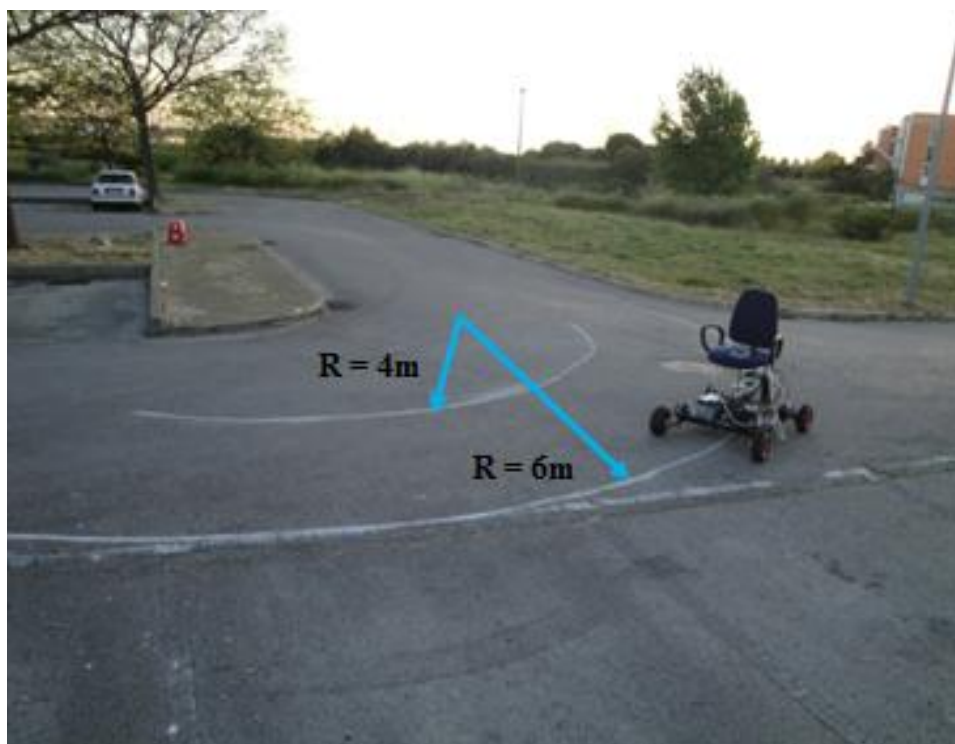


Figura 4.19 – Cenário experimental com a representação da trajetória.

As linhas desenhadas na estrada com giz elucidam a trajetória desejada. Neste trabalho foram consideradas três tipos de trajetórias, sendo que uma delas (raio infinito) foi tratada na página anterior.

De seguida, são apresentadas as trajetórias para um raio de 4 e 6 metros. Foi realizado um conjunto de testes, com o objetivo de garantir trajetórias que se aproximassem das trajetórias teoricamente desejadas.

4 metros de raio

Considerando um ensaio realizado com o joystick da velocidade, na posição P2 ($1,2 \text{ m.s}^{-1}$), com a ressalva que as mudanças do mesmo foram gradualmente ajustadas para P1 e P3, conforme a trajetória que o VUMU estava a efetuar, e o joystick da direção na posição FD, obtiveram-se os seguintes valores:

Tabela 4.11 – Valores medidos na trajetória de raio igual a 4 metros.

Eixos	Valores medidos												
X (m)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	9.58	9.15	8
Y (m)	0	-0.1	-0.19	-0.30	-0.385	-0.49	-0.56	-0.89	-1.8	-2.8	-4.6	-6.5	-10

Na Figura 4.20 é possível visualizar a discrepância entre a trajetória desenhada (simulada), representada pela cor vermelha, e a trajetória real pela cor azul.

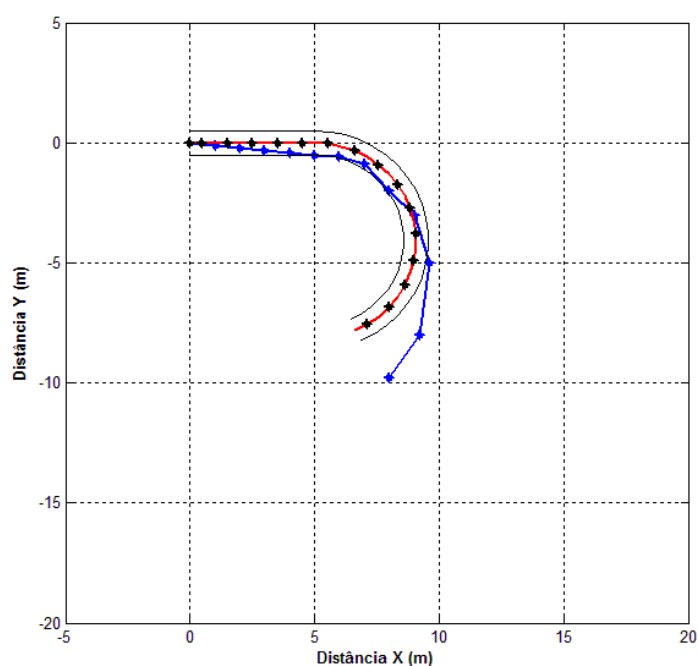


Figura 4.20 – Trajetória de R=4m.

6 metros de raio

Considerando um ensaio realizado com o joystick da velocidade, na posição P2 ($1,2 \text{ m.s}^{-1}$), sendo que as mudanças do referido joystick foram progressivamente ajustadas para P1 e P3 conforme a trajetória que o VUMU estava a efetuar, e o joystick da direção na posição FD, obtiveram-se os seguintes valores indicados na tabela 4.12:

Tabela 4.12 – Valores medidos na trajetória de raio igual a 6 metros.

Eixos	Valores medidos														
X (m)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10.6	10.7	10	8
Y (m)	0	-0.10	-0.21	-0.31	-0.4	-0.5	-0.58	-0.9	-1.8	-2.8	-4.6	-6.5	-10	-13	-15

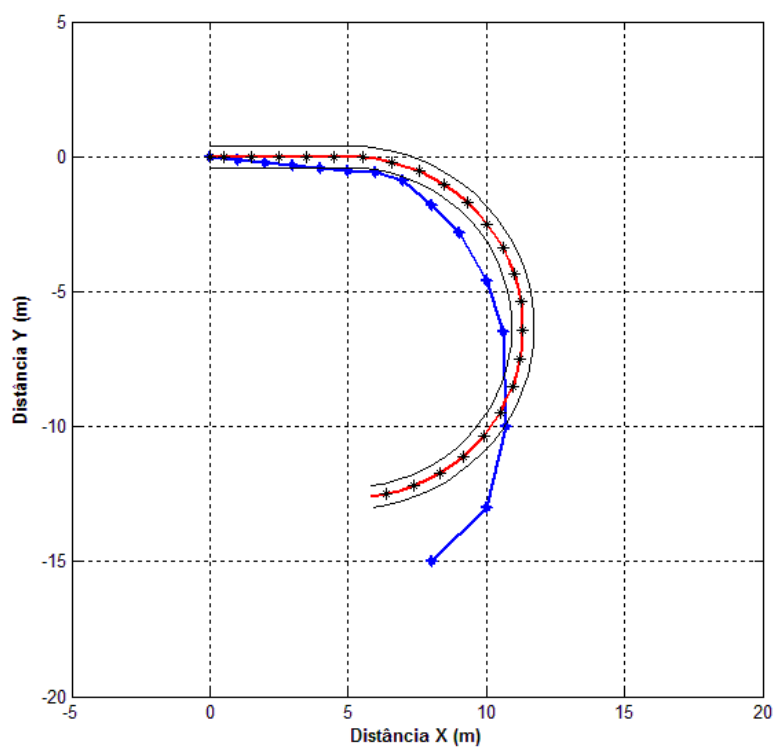


Figura 4.21 – Trajetória R=6m.

Capítulo 5. Conclusões e Trabalhos Futuros

O protótipo desenvolvido permitiu alcançar o objetivo principal de implementação do acionamento eletrónico de um veículo unipessoal de mobilidade urbana. Embora alguns dos resultados obtidos necessitem de melhoramentos relativamente à afinação dos parâmetros que regulam o movimento do veículo, é possível concluir que esta dissertação apresenta resultados positivos.

Tendo em conta que o projeto do acionamento eletrónico e construção do protótipo envolvia um investimento financeiro significativo, devido aos inúmeros componentes utilizados. O estudo detalhado dos diferentes motores, direções de veículos e respetivos algoritmos de controlo, a ponderação das suas vantagens e desvantagens revelou-se determinante no desenvolvimento da dissertação.

Durante a implementação do sistema de acionamento eletrónico surgiram alguns imprevistos que se relacionam fundamentalmente com defeitos nos materiais comprados, e dificuldades burocráticas associadas à aquisição dos mesmos (demora na entrega). De referir que inicialmente tinham sido selecionados motores passo-a-passo, dado que na altura se pensava serem mais apropriados para superar as barreiras arquitetónicas. Posteriormente decidiu-se efetuar o desenvolvimento do sistema com motores de corrente contínua, por se considerar o controlo de velocidade mais importante que o controlo de posição, assim como as inúmeras vantagens económicas inerentes ao restante material (placa de controlo, drivers e motores com escovas).

De notar que este protótipo possui a grande vantagem, de a gestão do sistema de acionamento eletrónico e de alimentação ser efetuada a partir de um único microcontrolador Arduino UNO. Tal característica permite reduzir a complexidade associada ao controlo e obter um veículo unipessoal de mobilidade urbana mais económico e fácil de reprogramar, comparativamente aos modelos existentes no mercado.

Tendo em conta as especificidades do projeto em estudo, decidiu-se, propositadamente, não efetuar qualquer tipo de comparação orçamental. Tal exercício poderia desencadear conclusões imprecisas, uma vez que o referido projeto, não contempla questões de natureza estética (revestimento de material, pinturas, acabamentos). Dito isto, entende-se ser apropriado, não concretizar comparações ao nível do custo final do produto (cadeira elétrica).

Numa perspetiva futura, seria importante realizar um maior número de testes, cobrindo o maior número de situações possíveis de diferentes trajetórias, de forma a tornar o código do algoritmo de controlo mais afinado. Além dos testes em superfície plana, também seriam realizados testes com inclinações diferentes, exigindo um controlo adaptativo.

Este trabalho foi idealizado como um complemento do mestrado em engenharia eletrotécnica e de computadores, mas também foi movido por uma outra motivação: proporcionar a todos os que sofrem de incapacidade para se moverem sem necessidade de auxílio, um meio prático e mais económico do que aqueles que se encontram no mercado.

Bibliografia

- [1] R. BERSCHE e J. C. TONOLLI, "Introdução ao Conceito de Tecnologia Assistiva," Brasil, 2006.
- [2] "Despacho nº3128," *Diário da República*, p. 7619, 2013.
- [3] "Despacho nº6133," *Ministério da Solidariedade e da Segurança Social*, vol. 91, p. 16408, 10 de Maio de 2012.
- [4] I. Instituto Nacional para a Reabilitação, "Avaliação da Atribuição dos Produtos de Apoio," 2013.
- [5] J. B. Pedro, "Habitação em Portugal: evolução e tendências," 2013.
- [6] R. Carneiro, "O Envelhecimento da População," Faculdade de Ciências Humanas Universidade Católica Portuguesa, Lisboa, 31 de Agosto de 2012.
- [7] E. Bim, Máquinas Eléctricas e Acionamento, Unicamp - Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, 2009.
- [8] S. Shrivastava, "Controlling DC Motor using Microcontroller with PWM," International Journal of Engineering Research, Jabalpur, 2012.
- [9] O. Oguntoyinbo, "Some principles of DC motors", Crouzet motor manuals, 2009.
- [10] S. Umans, Electric Machinery, McGraw-Hill Science, 2013.
- [11] B. H. L. N. G. B. F. Sabedin A. Meha, "CONTROLLING DC MOTOR SPEED USING PWM FROM C#," 2011.
- [12] W. Z. a. W. Zhan, "Sensitivity Analysis of Motor PWM Control," 2008.
- [13] F. Fambrini, "Solução por Software para Implementar PWM num Microcontrolador," [Online]. Available: <http://elvis-electronics-diy.atspace.cc/Microcontroladores/Implementado-PWM-em-Microcontroladores/Implementando-PWM-Em-Qualquer-Microcontrolador.htm>. [Acedido em 15 7 2013].
- [14] S. Lakkad, "Modeling and Simulation of Steering Systems for Autonomous Vehicles," 2003.
- [15] A. Creedy, Skid Steering of Wheeled and Tracked Vehicles, Victoria.
- [16] J.Y.Wong, Theory of Ground Vehicles, John Wiley & Sons.

- [17] G.W.Lucas, "A Tutorial and Elementary Trajectory Model for the Differential Steering System," 2000.
- [18] MIT, "Designing with D.C. Motors," 2007. [Online]. Available: <http://lancet.mit.edu/motors/>. [Acedido em 25 11 2013].
- [19] A. SA, "Arduino UNO," [Online]. Available: <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno>. [Acedido em 28 3 2014].
- [20] "TimerBlox: Voltage Controlled Pulse Width Modulator (PWM)," Linear Technology.
- [21] S. Spännare, "Some Power PWM Drivers For Electric DC Motors," Pico Technology, January 2002. [Online]. Available: http://www.picotech.com/applications/pwm_drivers/. [Acedido em 7 4 2014].
- [22] N. Semicondutor, "LM2596 Simple switcher," 1997.